

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шильяк Д. Неопределенные системы. – М.: Мир, 1995.
2. Гайдук А.Р. Алгоритмическое обеспечение самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией // Изв. АН. Т и СУ. – 2002. – № 3. – С. 56-63.
3. Гайдук А.Р. Алгебраические методы анализа и синтеза систем автоматического управления. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1988. – 208 с.

Гайдук Анатолий Романович

Технологический институт Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: gaiduk_2003@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371689.

Дрокин Денис Сергеевич

E-mail: objiako@mail.ru.

Gaiduk Anatoliy Romanovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: gaiduk_2003@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371689.

Drokin Denis Sergeevich

E-mail: objiako@mail.ru.

УДК 681.5.

Т.А. Пьявченко

**О ВЛИЯНИИ ТРАНСФОРМИРОВАННОЙ ПОГРЕШНОСТИ
НА ТОЧНОСТЬ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

Дается оценка трансформированной погрешности с анализом её влияния на точность вычисления кода управления.

Трансформированная погрешность; параметры закона управления; точность вычислений; допустимая погрешность.

T.A. Pyavchenko

**ABOUT INFLUENCE OF THE TRANSFORMED ERROR ON ACCURACY
OF CALCULATIONS**

The estimation of the transformed error with the analysis of its influence on accuracy of calculation of a code of control is given.

Transformed error; Parameters of the law of control; Accuracy of calculations; Allowable error.

Известно [1], что вычисления в микроконтроллере сопровождаются тремя видами погрешностей: трансформированной, метода и округления, или инструментальной. Погрешности метода и округления благодаря применению современных способов вычислений и прогрессивных средств вычислительной техники могут быть сведены к пренебрежимо малым величинам. Этого нельзя сказать о трансформированной погрешности, показывающей, как аппаратная погрешность,

присутствующая во входных переменных алгоритма вычислений \bar{y} , преобразуется благодаря вычислениям в погрешность значения выходной переменной – управляющего воздействия \bar{u} . Для подтверждения этого тезиса в настоящей работе предлагается оценить её влияние на точность вычисления кода управляющего воздействия в цифровых пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторах. На рис. 1 показана схема перехода от аппаратной погрешности $\sigma_{\text{вх}}^2$ к погрешности вычисления кода управляющего воздействия $\sigma_{\bar{u}}^2$.

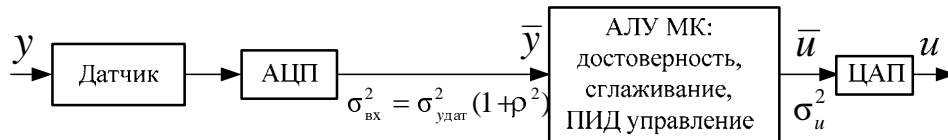


Рис. 1. Схема перехода от аппаратной погрешности к погрешности вычисления кода управляющего воздействия

При этом помимо ПИД-закона управления, в арифметико-логическом устройстве микроконтроллера (АЛУ МК) обязательно реализуется алгоритм проверки на достоверность и, в случае необходимости, алгоритм сглаживания [2].

Следует заметить, что оценка трансформированной погрешности выполняется на шаге дискретности по времени T_0 , равном шагу интегрирования и дифференцирования. При этом сигнал главной отрицательной обратной связи в замкнутой системе управления, который несет информацию о регулируемой переменной \bar{y} , должен поступать в каждом шаге T_0 , что обеспечит отсутствие накопления погрешностей вычислений на интервале интегрирования и дифференцирования [1].

Из приведенного выше определения трансформированной погрешности можно сделать вывод, что её величина зависит не только от аппаратной погрешности во входных переменных. Она будет зависеть и от значений параметров закона управления. В частности, от параметров ПИД-закона управления таких, как коэффициент пропорциональности $K_{\text{рег}}$, постоянная интегрирования $T_{\text{и}}$, постоянная дифференцирования $T_{\text{диф}}$ и шаг дискретности по времени T_0 .

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_i &= g - y_{i-1}, \\ u_{1i} &= K_{\text{рег}} \varepsilon_i, \\ u_{2i} &= u_{2(i-1)} + \frac{K_{\text{рег}} T_0}{2T_{\text{и}}} (\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}), \\ u_{3i} &= K_{\text{рег}} \frac{T_{\text{диф}}}{T_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \\ u_i &= u_{1i} + u_{2i} + u_{3i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots \\ \varepsilon_0 &= g, y_0 = 0, u_{20} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Алгоритм вычисления кода управления по ПИД-закону имеет вид формула (1). В этом алгоритме u_{1i} – пропорциональная составляющая кода управления; u_{2i} – интегральная составляющая, для которой приращение кода управляющего воздействия на шаге T_0 вычисляется по формуле Эйлера; u_{3i} – дифференциальная составляющая, вычисляемая по первой разности.

Дисперсию трансформированной погрешности при вычислении кода управления по алгоритму (1) можно оценить, используя выражение

$$\sigma_{\text{трфи}}^2 = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial F(u_{i-k}, \varepsilon_{i-k+1})}{\partial \varepsilon_{i-k+1}} \right)^2 \sigma_{\varepsilon i}^2 = \left(K_{\text{рег}}^2 + \frac{K_{\text{рег}}^2 T_0^2}{2T_{\text{и}}^2} + \frac{K_{\text{рег}}^2 2T_{\text{диф}}^2}{T_0^2} \right) \cdot (\sigma_{\text{удат}}^{\text{псп}})^2 (1 + \rho^2) k_{\text{прс}}^2, \quad (2)$$

полученное по методике, предложенной в [2. С. 160]. Помимо параметров ПИД-закона, в формуле (2) используются:

$(\sigma_{\text{удат}}^{\text{псп}})^2$ – дисперсия погрешности датчика, вычисленная по его паспортным данным в предположении нормального распределения,

$\rho \leq 0,5$ – доля погрешности датчика, принимаемая для АЦП,

$k_{\text{прс}} = k_{\text{АЦП}} \cdot k_{\text{ЦАП}}$ – коэффициент пересчета для АЦП (регулируемой переменной в код) и ЦАП (кода в напряжение), т.е.

$$k_{\text{прс}} = \frac{2^{N_{\text{АЦП}}} - 1}{D_{\text{у}}} \cdot \frac{D_{\text{у}}}{2^{N_{\text{ЦАП}}} - 1}. \quad (3)$$

Как видно из выражения (3), величина этого коэффициента зависит от разрядности соответствующих преобразователей и диапазонов изменения регулируемой переменной $D_{\text{у}}$ на входе АЦП и напряжения $D_{\text{у}}$ на выходе ЦАП.

Параметры закона управления обычно выбираются исходя из требований к точности и показателям качества переходного процесса. Статическая ошибка в системе управления будет равна нулю благодаря интегральной составляющей в ПИД-законе. Характер переходного процесса определяется динамикой объекта управления и параметрами настройки регулятора. Технологические процессы зачастую имеют транспортное запаздывание, применение ПИД-закона управления делает систему с таким запаздыванием робастно устойчивой [3].

Для примера оценим трансформированную погрешность при вычислении кода управляющего воздействия для объекта с параметрами: коэффициент передачи $K_{\text{оу}} = 2$, постоянная времени $T_{\text{оу}} = 600$ с и транспортное запаздывание $\tau_{\text{оу}} = 50$ с при трёх вариантах переходного процесса и соответствующих параметрах настройки ПИД-закона управления. При этом представим, что допустимая ошибка вычисления кода управляющего воздействия ограничена условием

$$\sigma_{\text{удоп}} \leq 0,001B. \quad (4)$$

Вариант 1. Параметры регулятора: $K_{\text{рег}} = 1,5$, $T_{\text{и}} = 415$ с, $T_{\text{диф}} = 50$ с, $T_0 = 10$ с. График переходного процесса для сигнала рассогласования, полученный путем моделирования структуры цифроаналоговой системы (рис. 2), показан на

рис. 3. Время вхождения сигнала рассогласования в 5 %-ную трубку составляет 380 с. В выражении (3) $N_{\text{АЦП}} = 12$, $N_{\text{ЦАП}} = 8$, $D_y = 12$ м, $D_u = 5B$, что дает $k_{\text{прс}} = 6,69B/м$. В результате среднеквадратичное значение трансформированной погрешности, вычисленное как $\sqrt{\sigma_{\text{трфи}}^2}$, равно 0,621 В (см. (2)), т.е. значительно превышает по величине величину допустимой ошибки вычислений (4).

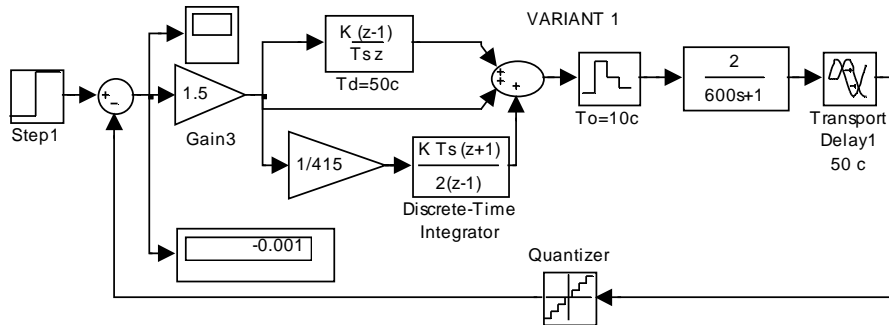


Рис. 2. Структурная схема модели цифроаналоговой системы регулирования

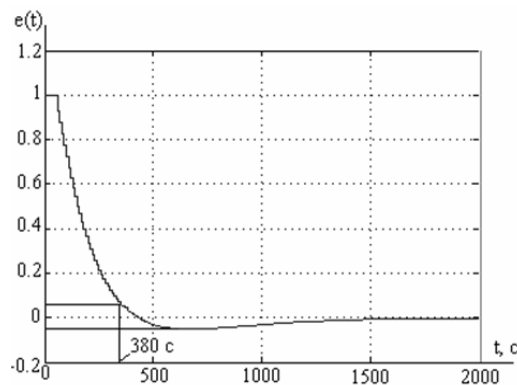


Рис. 3. График сигнала рассогласования $e(t)$ для варианта 1

Вариант 2. Параметры регулятора: $K_{\text{рег}} = 0,89$; $T_{\text{И}} = 600$ с, $T_{\text{диф}} = 5$ с, $T_0 = 10$ с. Остальные параметры те же, что и в *варианте 1*. Как видно из графика переходного процесса для сигнала рассогласования $e(t)$ (рис. 4), время вхождения в 5 %-ную трубку составляет 900 с. Значение трансформированной погрешности составляет 0,0632 В, что на порядок меньше предыдущего варианта, но всё же не удовлетворяет условию (4).

Можно продолжить подбор параметров регулятора с тем, чтобы получить меньшее время регулирования, например *вариант 3*.

Вариант 3. Параметры регулятора: $K_{\text{рег}} = 2$; $T_{\text{И}} = 600$ с, $T_{\text{диф}} = 5$ с, $T_0 = 10$ с. Как видно из графика переходного процесса для сигнала рассогласования $e(t)$ (рис. 5), время вхождения в 5%-ную трубку составляет 310 с. При этом трансформированная погрешность составляет 0,0548 В.

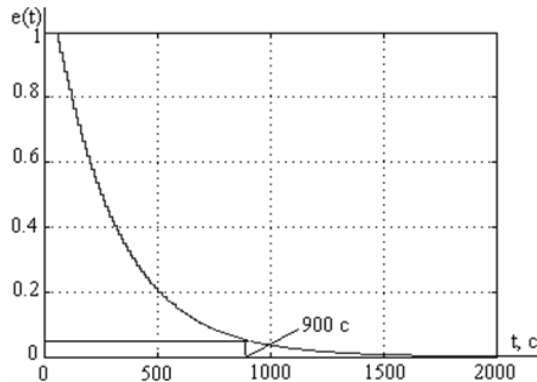


Рис. 4. График сигнала рассогласования $e(t)$ для варианта 2

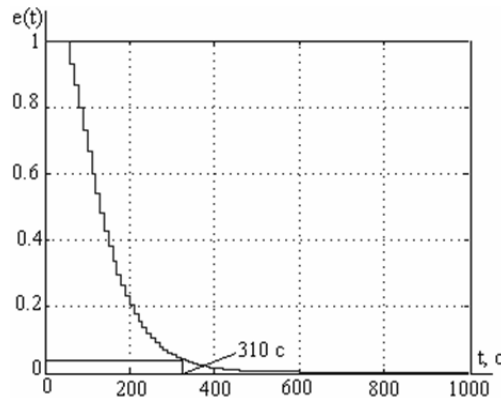


Рис. 5. График сигнала рассогласования $e(t)$ для варианта 3

Из представленных примеров видно, что трансформированная погрешность значительно зависит от параметров закона управления и коэффициента пересчета (3). Последний можно уменьшать, если увеличивать разрядность ЦАП до разрядности АЦП, а иногда и больше, чтобы погрешность смещалась в младшие разряды при введении алгоритма сглаживания [2]. Так, при разрядности ЦАП, равной разрядности АЦП, т.е. 12, $k_{прс} = 0,4167 В / м$ и дисперсия трансформированной погрешности по вариантам соответственно составит:

$$\sigma_{трф\text{вар}1} = 0,0387В, \sigma_{трф\text{вар}2} = 0,004В, \sigma_{трф\text{вар}3} = 0,0034В.$$

Как видим, даже при существенном уменьшении коэффициента пересчета за счет увеличения количества разрядов ЦАП величина трансформированной погрешности превышает допустимую (4). Её можно уменьшить введением алгоритма сглаживания с коэффициентом ослабления, изменяющимся в диапазоне: $2 \leq \eta \leq 10$. Однако с параметрами регулятора *варианта 1* невозможно обеспечить допустимую ошибку даже при $\eta = 10$. В этом случае остается только один выход: переходить к другим параметрам настройки регулятора, например по *варианту 3*.

В заключение отметим, что основной погрешностью, которая должна учитываться при оценке точности вычисления кода управляющего воздействия, является **трансформированная погрешность**. Для её уменьшения следует:

- 1) увеличивать число разрядов ЦАП;
- 2) вводить сглаживание или усреднение отсчетов;
- 3) и даже изменять параметры в регуляторе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пьявченко Т.А.* Исследование особенностей цифровой реализации алгоритмов контроля, фильтрации и управления. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1994. – 26 с.
2. *Пьявченко Т.А.* Алгоритмы первичной обработки информации // Известия ТРТУ. Тематический выпуск “Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении”. – 2005, № 1 (45). – С.
3. *Пьявченко Т.А., Финаев В.И.* Автоматизированные информационно-управляющие системы: Учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 268 с.

Пьявченко Тамила Алексеевна

Технологический институт Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: pta@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371689.

Ryavchenko Tamila Alekseevna

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: pta@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371689.

УДК 681.5:681.3(075.8)

Д.С. Дрокин

ПОСТРОЕНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДНЫХ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Изложены теоретические основы построения наблюдателей производных переменных электрических сетей. Проведено построение наблюдателей и их моделирование. Электрические сети; наблюдатель; система.

D.S. Drokin

CONSTRUCTION OF OBSERVERS OF DERIVATIVES FOR ELECTRIC NETWORKS

Theoretical bases of construction of observers of derivatives variables for electric networks are stated. Construction of observers for system is spent and they modeling. Electric networks; the observer; system.

Сеть электроснабжения может иметь сложную структуру, обусловленную территориальным расположением потребителей, источников, требованиями надёжности и другими соображениями. В сети выделяют линии электропередачи, которые соединяют подстанции. Линии могут быть одинарными и двойными (двухцепными), иметь ответвления (отпайки). К подстанциям, как правило, подхо-