

УДК 681.513.5

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АСУТП НА БАЗЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

© 2021 г. А. А. Иванова<sup>1,\*</sup>, А. О. Толоконский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” Москва, 115409, Россия

\*e-mail: ivanovaanna96@mail.ru

Поступила в редакцию 21.07.2021 г.

После доработки 22.07.2021 г.

Принята к публикации 27.07.2021 г.

В современных системах управления показатели качества процесса управления разделяются на прямые и косвенные. К прямым показателям качества относятся свойства, определяемые по переходным характеристикам системы, к косвенным показателям качества относятся корневые, частотные и интегральные показатели. В данной статье рассматривается возможность применения квадратичных интегральных критериев качества для систем автоматического управления. Проведен анализ на предмет возможности и целесообразности применения такого критерия в цифровых системах управления, построенных на базе программно-технических комплексов с применением принципов оптимального управления. Для проведения данного анализа в статье рассмотрена система автоматического регулирования с классическим пропорционально-интегральным регулятором. В алгоритм данной системы была добавлена функция вычисления мгновенного и интегрального квадратичных, а также среднеквадратического отклонений желаемого регулируемого параметра от реального сигнала на выходе объекта управления. Вычисление критериев происходило по всему переходному процессу, а также на каждом периоде вызова регулятора. Далее полученные результаты сравнивались. Результатом проведенной работы стал вывод о возможности применения интегральных критериев качества в цифровых системах управления, построенных на базе программно-технических комплексов.

*Ключевые слова:* законы регулирования, автоматическое регулирование, критерии качества, интегральные показатели качества, оптимальный закон управления, квадратичный критерий качества, среднеквадратический критерий, оценка качества

DOI: 10.1134/S2304487X21040064

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое использование получило применение систем управления на базе программно-технических комплексов (ПТК) с применением типовых законов регулирования чаще всего пропорционально-интегральных (ПИ), пропорционально-интегральных дифференциальных (ПИД) в случае применения в системе регулирования пропорциональных исполнительных механизмов и регулирующих органов. А также пропорциональных (П) и пропорционально-дифференциальных (ПД) в случае применения в системе регулирования исполнительных механизмов и регулирующих органов интегрирующего типа. Показатели качества процесса управления делятся на прямые и косвенные [1, 2]. К прямым показателям качества, которые применяются при настройке типовых законов регули-

рования, относятся характеристики, определяемые непосредственно по переходной характеристике. К косвенным показателям качества относятся интегральные показатели, корневые и частотные. На рисунке 1 представлены критерии качества во временной области [1].

Согласно рисунку 1 определяются следующие прямые показатели качества:

- величина ошибки регулирования в статическом режиме работы системы  $e_0$ ;
- время установления  $T_e$  – время, за которое переходная характеристика входит в 5% (величина  $e_s$ ) коридор от требуемого значения (уставки системы регулирования);
- максимум переходной характеристики и временное сечение его достижения  $e_{\max}$  и  $T_{\max}$  соответственно. Обычно вместо максимума ис-

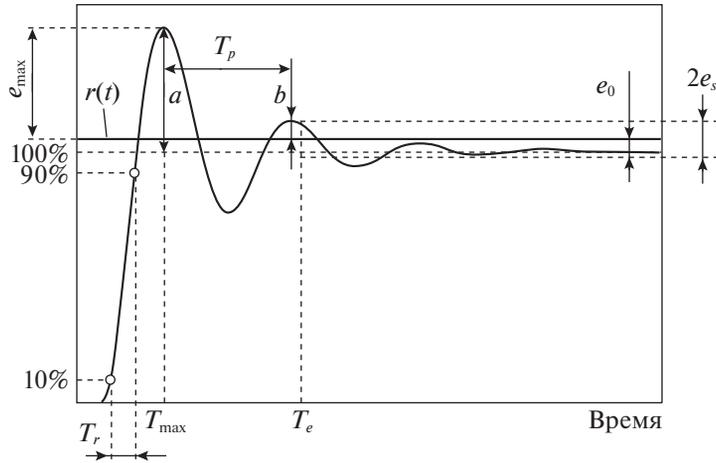


Рис. 1. Критерии качества во временной области.

пользуется показатель перерегулирования  $\delta$ , выражающий в процентах долю максимума от установившегося значения;

- расстояние между соседними максимумами или минимумами переходной характеристики  $T_p$ ;
- время нарастания от 10 до 90% от установившегося значения  $T_r$ ;

– степень затухания  $\psi = \frac{a-b}{a}$ , определяющая интенсивность затухания колебательной составляющей переходного процесса.

В качестве корневого показателя качества применяется корневой показатель колебательности, определяемый следующим образом. Согласно [3], переходный процесс представляет собой

линейную комбинацию аperiодических компонент (одна компонента соответствует одному вещественному корню характеристического уравнения системы) и колебательных компонент (одна компонента соответствует одной паре комплексно-сопряженных корней  $a_i \pm b_i j$  характеристического уравнения системы). Соответственно, корневой показатель колебательности  $m = \min \left\{ \frac{|a_i|}{|b_i|} \right\}$  [3].

Корневой показатель колебательности связан со степенью затухания переходного процесса соотношением (1):

$$\psi = 1 - e^{(-2\pi m)} \quad (1)$$

Критерии качества в частотной области представлены на рисунках 2 и 3: амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) замкнутой системы и амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) разомкнутой системы.

По АЧХ замкнутой системы определяются следующие частотные показатели качества [1]:

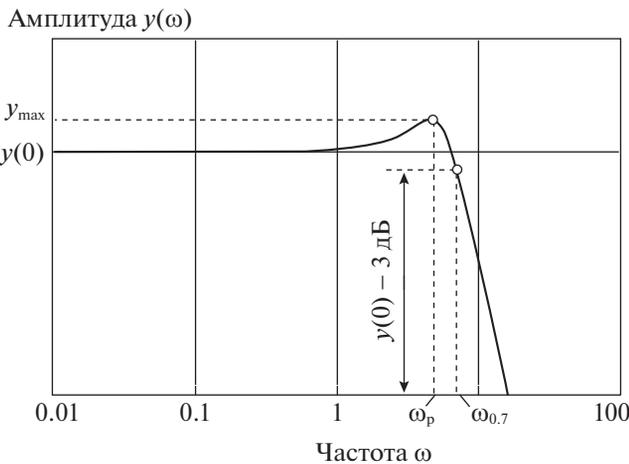


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы.

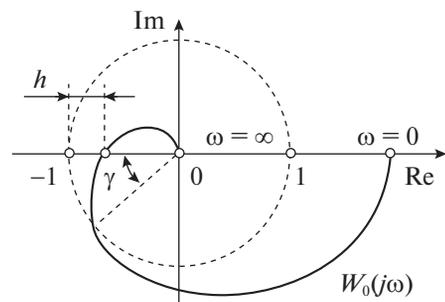


Рис. 3. АФЧХ разомкнутой системы.

– полоса пропускания: отрезок частот от нуля до  $\omega_{-3\text{дБ}}$ , в границах которого АЧХ снижается не более, чем на 3 дБ;

– резонансная частота замкнутой системы  $\omega_p$ , на которой АЧХ достигает максимума;

– показатель колебательности  $M$  определяется отношением максимума АЧХ к значению АЧХ в установившемся режиме (на нулевой частоте).

По АФЧХ разомкнутой системы определяют запасы устойчивости по фазе  $\gamma$  и амплитуде  $h$ . Запас устойчивости по фазе определяется величиной угла между следующими векторами на комплексной плоскости, отложенными от начала координат: в точку с координатами  $(-1; 0j)$  и в точку пересечения АЧХ и единичной окружности (АЧХ пересекает данную окружность на частоте среза  $\omega_{\text{ср}}$ , на которой разомкнутая система обеспечивает единичное усиление). Запас устойчивости по амплитуде равен расстоянию между точкой  $(-1; 0j)$  и точкой пересечения АЧХ с осью абсцисс (если таких пересечений несколько, то выбирается минимальное расстояние).

Интегральные критерии качества путем их минимизации позволяют выбрать лучшую систему в классе, определяемом соответствующим критерием. Применение интегральных критериев рассмотрено в работах [4–6].

Основными требованиями, предъявляемыми к системам автоматического регулирования (кроме требования устойчивости), являются определенная величина степени затухания и минимизация максимального отклонения переходного процесса. Для поиска соответствующих оптимальных систем используют следующие интегральные показатели качества [3, 7], определяемые формулами 2–5:

– площадь под графиком переходной характеристики (рисунок 1);

$$I = \int_0^{\infty} |h(t)| dt \quad (2)$$

– линейный интегральный показатель;

$$I = \int_0^{\infty} h(t) dt \quad (3)$$

– интегрированная абсолютная ошибка;

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (4)$$

– интеграл от квадрата ошибки.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (5)$$

## ОСНОВНАЯ ТЕМА

Рассмотрим более подробно квадратический критерий качества для системы автоматического управления и проведем анализ на предмет целесообразности его применения в цифровых системах автоматического управления, построенных на базе программно-технических комплексов с применением принципов оптимального управления. В системах автоматического управления осуществляется сравнение эталонного процесса – так называемой уставки  $y_{\text{эт}}$  от текущего состояния регулируемого параметра или желаемого значения процесса. Данная оценка квадратичная оценка  $J_{\text{эт}}$  определяется уравнением:

$$J_{\text{эт}} = \int_0^{\infty} \delta^2(t) dt = \int_0^{\infty} [y_{\text{эт}}(t) - y(t)]^2 dt \quad (6)$$

Оценка  $J_{\text{эт}}$  представляет собой площадь, ограниченную кривой отклонения  $\delta^2$  процесса управления в исследуемой системе  $u_{\text{пер}}$  от рационально назначенного наилучшего процесса  $u_{\text{эт}}$  (рисунок 1). Необходимым условием сходимости оценки  $J_{\text{эт}}$  служит равенство:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{\text{эт}}(t) - y(t)| = 0,$$

которое, в реальных системах регулирования обеспечивает работающий регулятор. В оптимальной системе регулирования, обычно задается значением критерия качества, и в соответствии с этим критерием качества выбирают управляющее воздействие, которое будет подано в заданный момент времени. Применение квадратических интегральных критериев качества подробно показаны в работах [8, 9].

Рассмотрим контур автоматического регулирования, структурная схема которого представлена на рисунке 4.

Обозначения на рисунке 4:  $SP$  – уставка,  $E$  – сигнал рассогласования,  $Y$  – управляющее воздействие,  $Z$  – возмущение,  $X$  – выходной сигнал (регулируемый параметр),  $PV$  – сигнал обратной связи. Для представленной на рисунке 4 системы регулирования с классическим ПИ-регулятором добавим в алгоритм управления функции вычисления интегрального и мгновенного квадратических отклонений. Это будет отклонение желаемого регулируемого параметра от реального выходного сигнала, на выходе объекта управления.

Зададимся значением уставки на входе регулятора и при разных значениях настроечных параметров, рассмотрим реакцию системы регулирования. На рисунках 6, 7, 8 и 9 красным цветом показаны графики изменения желаемого значения, зеленым – реакция объекта управления на управляющее воздействие, синим – значения инте-

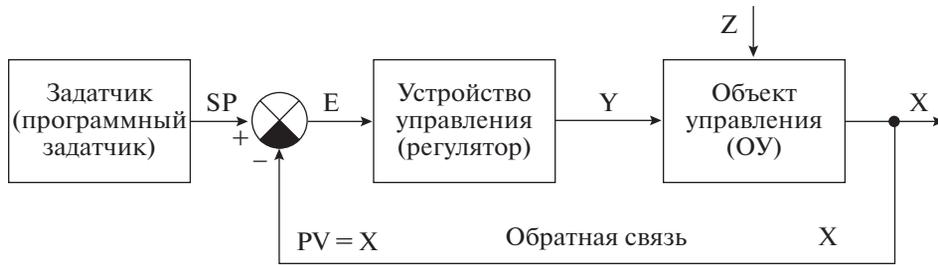


Рис. 4. Структурная схема контура автоматического регулирования.

```

A[24].VALUE = (A[1].VALUE * A[23].VALUE + (A[3].VALUE / A[2].VALUE) * A[24].VALUE)
rem Возмущающее воздействие
A[18].VALUE = A[7].VALUE * A[3].VALUE * A[17].VALUE + A[18].VALUEOLD
rem Ограничение возмущающего воздействия не больше 3 в данном примере
IF A[18].VALUE > 3 THEN A[17].VALUE = 0
rem Расчет критерия СКО
A[33].VALUE = A[33].VALUE + (A[31].VALUE - A[24].VALUE) * (A[31].VALUE - A[24].VALUE)
A[34].VALUE = (A[31].VALUE - A[24].VALUE) * (A[31].VALUE - A[24].VALUE)
rem (A[31].VALUE - A[24].VALUE)
rem Инициализация работы
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[21].VALUE = 0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[22].VALUE = 0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[23].VALUE = 0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[24].VALUE = 0
IF A[11].VALUE = 0 THEN A[18].VALUE = 0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[33].VALUE = 0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[34].VALUE = 0
  
```

Рис. 5. Интерфейс программы вычисления интегральных и мгновенных квадратичных отклонений.

грального квадратического критерия качества, а розовым – значения мгновенного квадратического критерия качества, при значениях коэффициента пропорциональности регулятора  $K = 2, 4, 8$  и  $50$  соответственно. Из графиков на рисунке 6 видно, что время выхода на уставку составляет приблизительно 28 секунд. При этом интегральный квадратический критерий достигает своего максимального значения 12331.480.

На рисунке 7 время выхода на уставку составляет 24 секунды, а интегральный квадратический критерий становится равным 9909.105.

На рисунке 8 уставка достигается через 22 секунды, а интегральный квадратический критерий достигает максимума 7085.468. Здесь прослеживается тенденция уменьшения времени переходного процесса с ростом коэффициента пропорциональности регулятора, что в свою очередь, со-

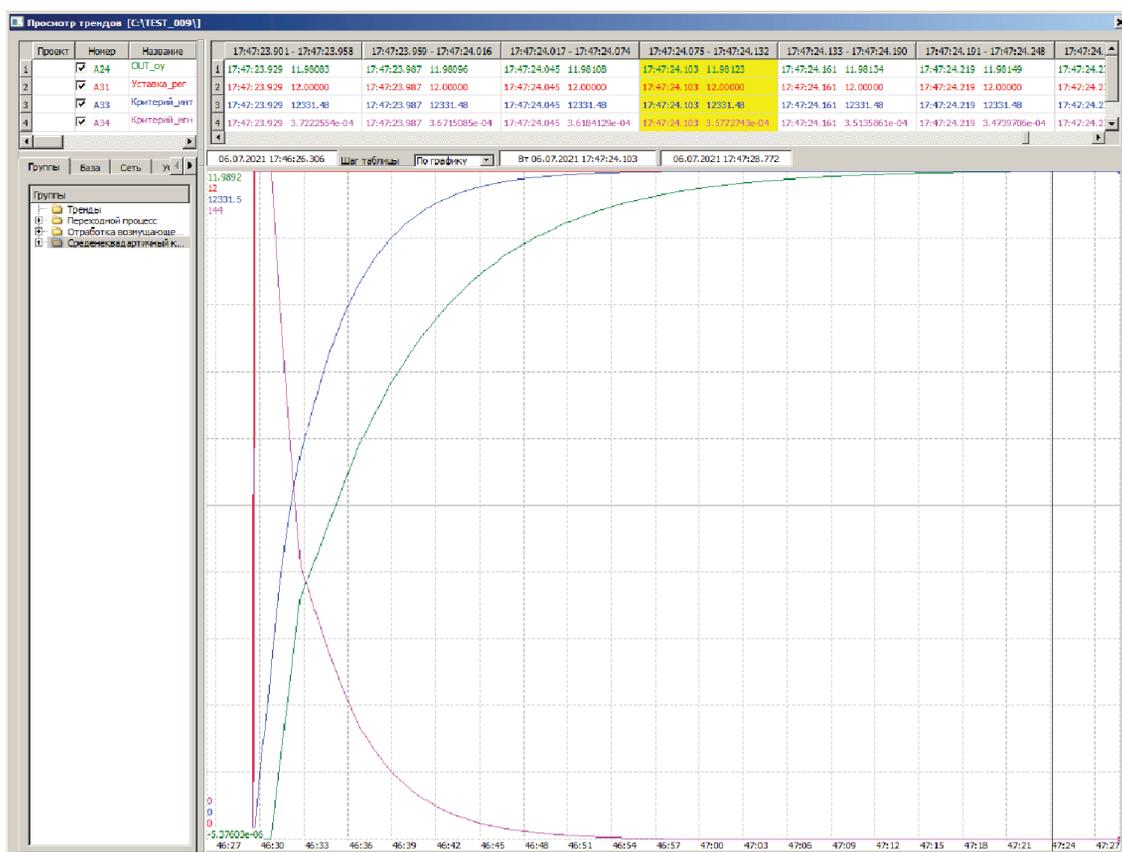


Рис. 6. Реакция системы регулирования при подаче на вход регулятора значения уставки 12 при коэффициенте пропорциональности  $K = 2$ .

ответствует улучшению качества регулирования. При этом значение интегрального критерия также уменьшается с ростом коэффициента пропорциональности регулятора.

Однако при значительном увеличении коэффициента пропорциональности, например, до  $K = 50$ , система регулирования переходит в режим автоколебаний, что показано на рисунке 9. На графике переходного процесса видно, что в момент наступления автоколебаний, значение интегрального критерия принимает наименьшее значение из всех представленных случаев эксперимента, но с течением времени в процессе автоколебаний регулируемой величины значение критерия начинает значительно увеличиваться и превышает значения критерия в случаях работы системы регулирования без автоколебаний. Поэтому мгновенная интегральная оценка качества может служить характеристикой качества переходного процесса только для монотонных процессов. Для исключения случаев, когда интегральный критерий качества регулирования не отражает качества работы системы регулирова-

ния, иными словами, когда интегральный критерий регулирования не работает, целесообразно использовать комбинацию интегрального среднеквадратического критерия и мгновенного. Более подробно применение таких комбинаций критериев описано в [10].

Так как регуляторы, с которыми мы работаем, не являются непрерывными, а имеют период вызова управляющего значения, то использование среднеквадратичных критериев качества по всему переходному процессу становится не совсем удобным, так как данный критерий не отражает качество рассчитанного управляющего воздействия в заданный промежуток времени между управляющими воздействиями. В таком случае лучше использовать среднеквадратический критерий качества, вычисляемый на каждом периоде вызова регулятора.

На рисунке 10 изображена реакция системы автоматического управления, при коэффициенте пропорциональности  $K = 6$ , которая отрабатывает управляющее воздействие с периодом вызова

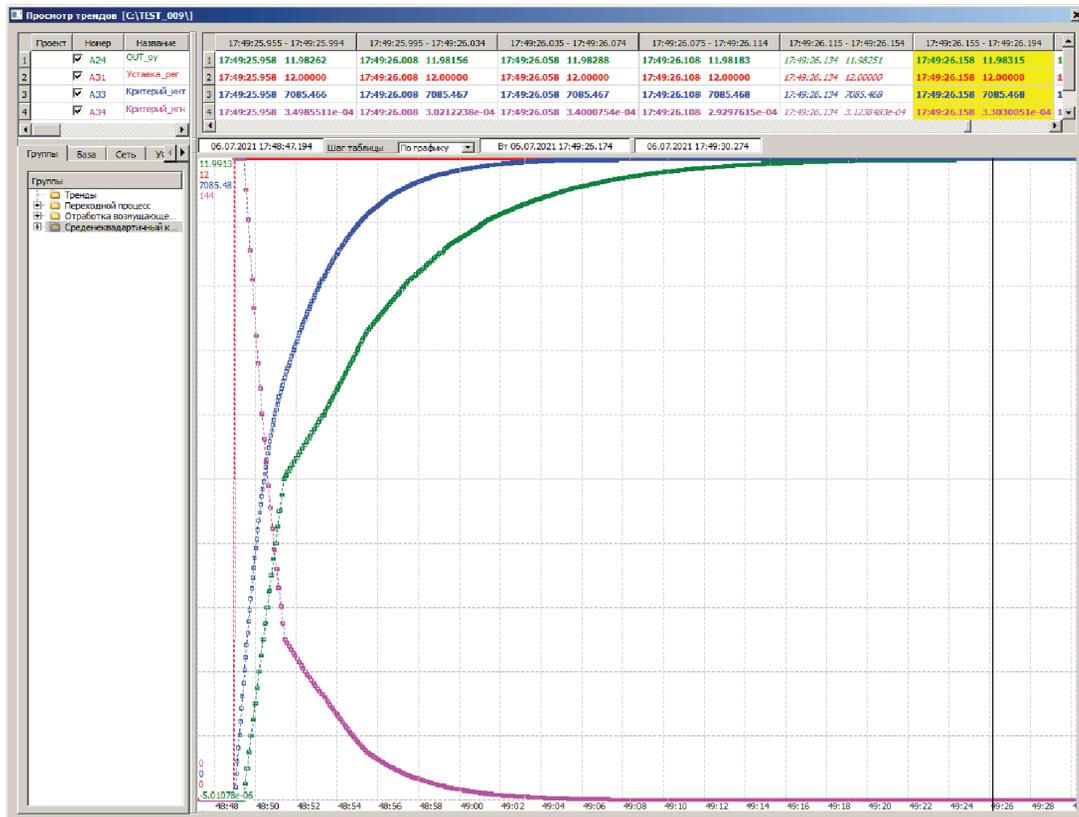


Рис. 7. Реакция системы регулирования при подаче на вход регулятора значения уставки 12 при коэффициенте пропорциональности  $K = 4$ .

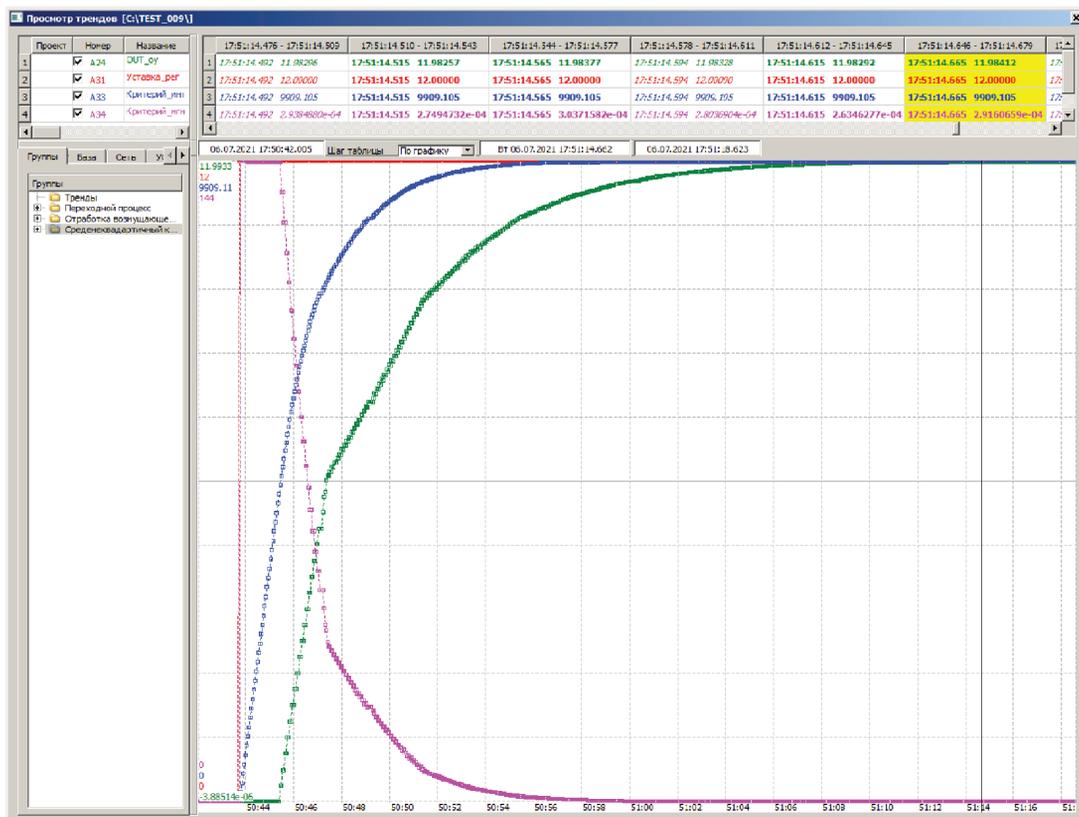


Рис. 8. Реакция системы регулирования при подаче на вход регулятора значения уставки 12 при коэффициенте пропорциональности  $K = 8$ .

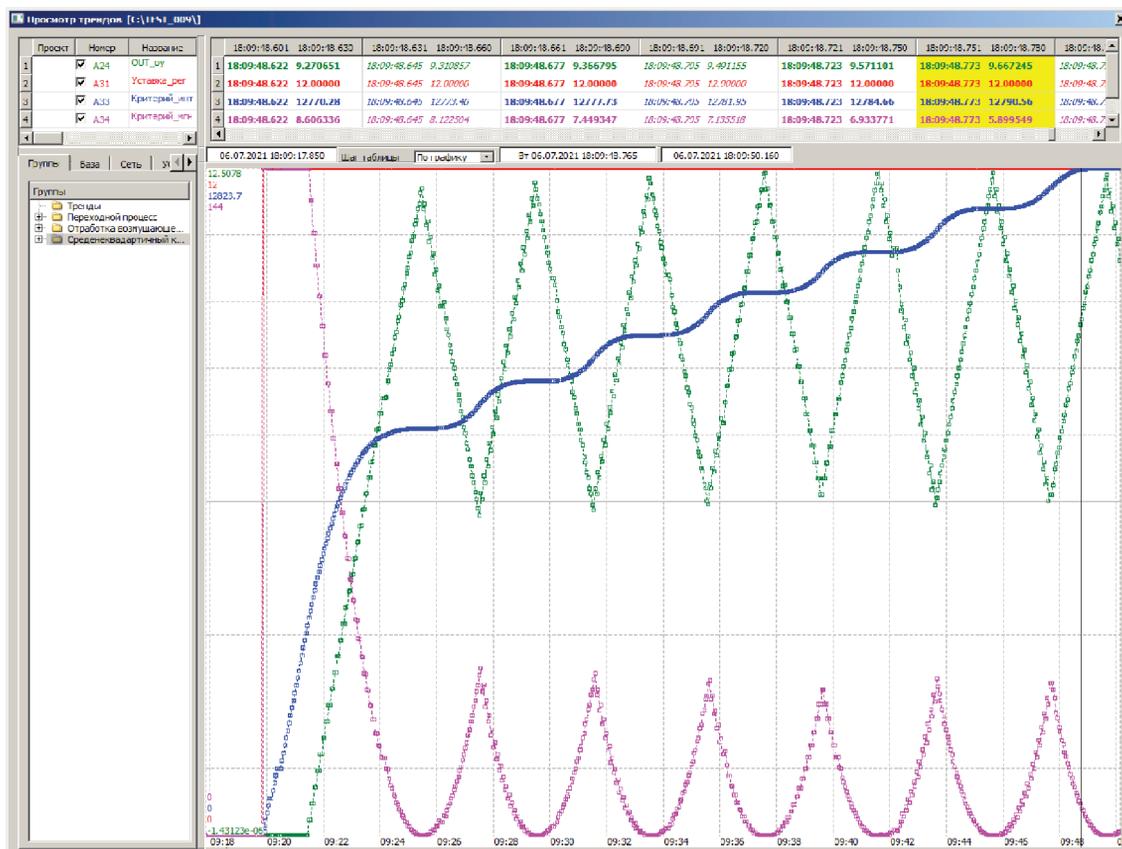


Рис. 9. Реакция системы регулирования при подаче на вход регулятора значения уставки 12 при коэффициенте пропорциональности  $K = 50$ .

регулятора равное 2 секундам. С этим же периодом осуществляется расчет интегрального среднеквадратического критерия качества системы управления, причем расчет осуществляется с обнулением значения критерия с предыдущего периода управления. На рисунке красным цветом показан график изменения желаемого значения, зеленым цветом — реакция объекта управления, а синим — нарастающее в течение периода управления значение критерия качества. Из графиков видно, что уставка достигается через 8 секунд, а значение критерия оптимальности уменьшается с уменьшением величины рассогласования. Это дает нам право сделать вывод о возможности применения среднеквадратичного критерия качества для оценки качества управления в цифровых системах управления, построенных на базе программно-технических комплексов, а также для реализации оптимальных законов управления, используя подобные аппаратные средства.

Колебания, наблюдаемые на графике реакции объекта управления на управляющее воздействие вызваны неидеальностью системы, помехами, маленьким шагом дискретизации программы и т.д.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность применения интегральных критериев качества управления к цифровым системам, построенным на базе ПТК с применением типовых законов регулирования.

Для того чтобы определить данную возможность была рассмотрена система с типовым ПИ-регулятором, в алгоритм которой включены функции вычисления интегрального и мгновенного критериев качества, а также среднеквадратического интегрального критерия качества. На входе регулятора задавалась уставка при значениях коэффициента пропорциональности регулятора  $K = 2, 4, 8, \text{ и } 50$ . При сравнении графиков полученных в результате исследования для  $K = 2, 4 \text{ и } 8$ , прослеживалась следующая закономерность: с ростом коэффициента пропорциональности регулятора уменьшалось время переходного процесса. При этом значение интегрального критерия также уменьшается с ростом коэффициента пропорциональности регулятора. Полученные результаты свидетельствуют об улучшении качества регулирования.

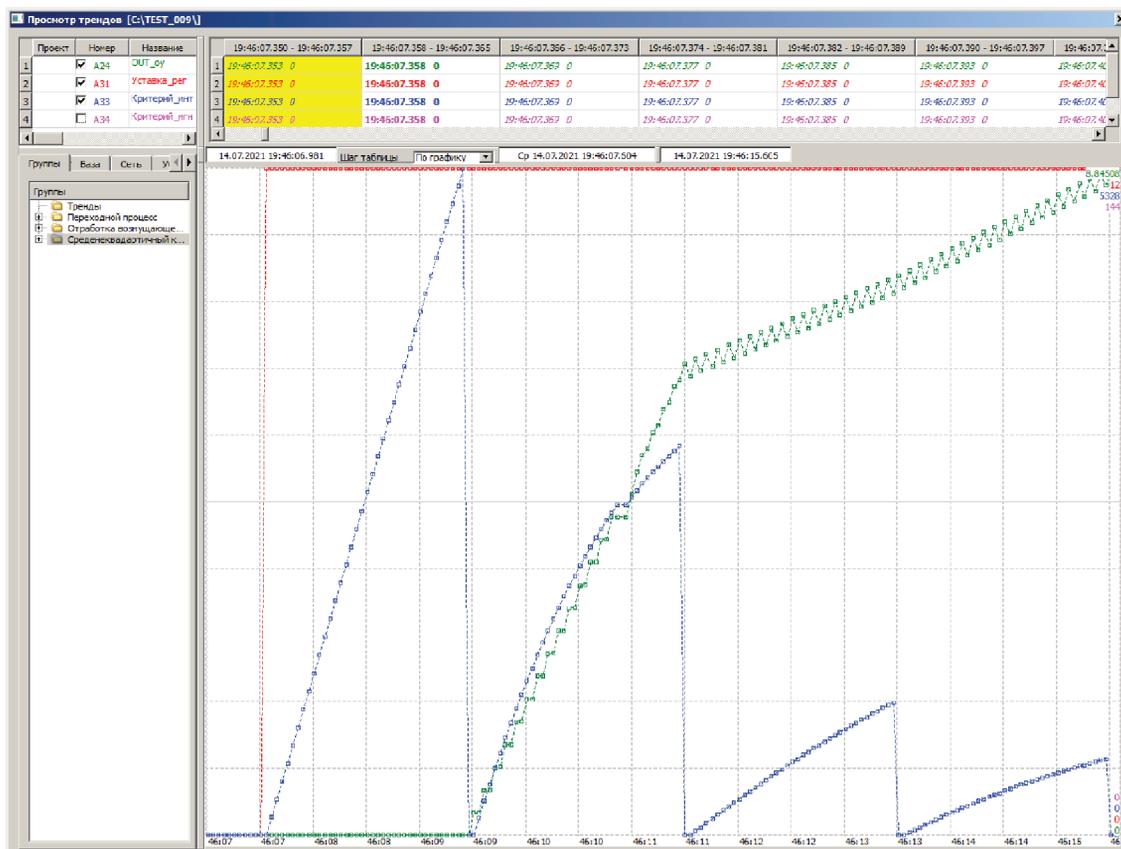


Рис. 10. Реакция системы регулирования при подаче на вход регулятора значения уставки 12 при коэффициенте пропорциональности  $K = 6$  и расчете критерия качества управления каждый период вызова управляющего воздействия.

Однако при увеличении коэффициента пропорциональности до значения  $K = 50$  система регулирования переходит в автоколебательный режим. При этом, в процессе автоколебаний, значение критерия значительно увеличивается и превышает значения критерия для систем без автоколебаний. Поэтому мгновенная интегральная оценка качества может служить характеристикой качества переходного процесса только для монотонных процессов.

Так как регуляторы, с которыми мы работаем, не являются непрерывными, а имеют период вызова управляющего значения, то использование интегральных критериев качества по всему переходному процессу становится не совсем удобным. Поэтому было предложено использовать среднеквадратический критерий качества, вычисляемый на каждом периоде вызова регулятора. Результаты, полученные при использовании среднеквадратического критерия, рассчитываемого с нуля на каждом периоде вызова регулятора при  $K = 6$ , показывают что значение уставки достигается в разы быстрее, чем при использовании интегральных критериев качества, рассчитываемых

по всему переходному процессу. Значение критерия оптимальности уменьшается с уменьшением величины рассогласования и достигает своего минимума в конце переходного процесса.

Полученные в ходе исследования результаты позволяют нам сделать вывод о возможности использования среднеквадратических критериев качества для оценки качества управления в цифровых системах управления построенных на базе программно-технических комплексов, а также для реализации оптимальных законов управления, используя подобные аппаратные средства

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 606 с.
2. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.

4. Марданов М.Д., Теймуров Р.А. Необходимые условия оптимальности в одной задаче оптимального управления для параболического уравнения с не-локальными интегральными условиями // Доклады академии наук. 2017. Т. 472. № 2. С. 135–138.
5. Бекбаев А.Б., Акпанбетов Д.Б., Жумаев А.К. Оптимальное управление многодвигательным электроприводом // Автоматизация, моделирование та методи оптимізації. Електромеханічні і енергозберігаючі системи, 2012. № 3 (19). С. 370–372.
6. Задорожний В.Г., Грекиш В. Об оптимальном линейном регуляторе со случайно изменяющейся структурой // Вестник ВГУ, серия: системный анализ и информационные технологии, 2011. № 1. С. 15–21.
7. Åström K.J., and Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning (2nd edition), NC, Instrument Society of America, 1995.
8. Яндульский А.С., Марченко А.А., Хоменко О.В., Мацейко В.В. Повышение эффективности работы центрального регулятора САРПЧ при регулировании частоты и перетоков мощности в ОЭС Украины // Вісник чернігівського державного технологічного університету, 2013. № 3 (67). С. 233–238.
9. Яндульский А.С., Марченко А.А., Хоменко О.В., Мацейко В.В. Оптимізація параметрів системного регулятора для автоматичного регулювання частоти та активної потужності в ОЕС України // Наукові праці ДонНТУ. Серія: “Електротехніка і енергетика”, 2013. № 2 (15). С. 294–298.
10. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1966. 624 с.

---

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2021, vol. 10, no. 4, pp. 318–327

---

## Integral Methods for the Analysis of the Quality of Regulation of Technological Processes in an Automated Control System Based on a Hardware–Software Complex

A. A. Ivanova<sup>a,#</sup> and A. O. Tolokonskij<sup>a</sup>

<sup>a</sup> National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

<sup>#</sup>e-mail: ivanovaanna96@mail.ru

Received July 21, 2021; revised July 22, 2021; accepted July 27, 2021

**Abstract**—In modern control systems, the quality indicators of the control process are divided into direct and indirect. Direct quality indicators include properties determined by the transient characteristics of the system. Indirect quality indicators include root, frequency and integral indicators. The possibility of applying quadratic integral quality criteria for automatic control systems has been considered in this work. The analysis is carried out for the possibility and expediency of using such a criterion in digital control systems built based on software and hardware complexes using the principles of optimal control. To perform this analysis, an automatic control system with a classical proportional-integral regulator is considered. The function of calculating the instantaneous and integral quadratic and root-mean-square criteria of the desired controlled parameter from the real signal at the output of the control object has been added to the algorithm of this system. The criteria have been calculated throughout the entire transition process, as well as at each period of the controller call. Then, the results obtained are compared. The possibility of applying integral quality criteria in digital control systems built on the basis of software–hardware complexes has been demonstrated.

**Keywords:** laws of regulation, automatic regulation, quality criteria, integral quality indicators, optimal control law, quadratic quality criterion, root-mean-square criterion, quality assessment

DOI: 10.1134/S2304487X21040064

### REFERENCES

1. Denisenko V.V., *Komputernoe upravlenie tehnologicheskim processom, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of technological process, experiment, equipment]. Moscow, Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2014. 606 p.
2. Gudvin G.K., *Proektirovanie sistem upravleniya* [Design of control systems]. Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy Publ., 2004. 911 p.
3. Rotatsch V.Ya., *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnyk dlya vuzov* [The theory of automatic control: a textbook for universities]. Moscow, Izdatelskiy dom MEI Publ., 2008. 396 p.
4. Mardanov M.D., Teymurov R.A. Neobhodimye usloviya optimal'nosti v odnoy zadache optimal'nogo upravleniya dlya parabolicheskogo uravneniya s nelo-kal'nymi integral'nymi usloviyami [Necessary optimality conditions in one optimal control problem for a parabolic equation with non-local integral conditions].

- Doklady akademii Nauk*, 2017, vol. 472, no. 2, pp. 135–138. doi: 10.7868/S0869565217020050 (in Russian)
5. Bekbayev A.B., Akpanbetov D.B., Zhumaev A.K. Optimum control of the multiengine electric drive. *Automation, modeling and optimization methods, Electromechanical and energy-saving systems*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 370–372. (in Ukrainian)
  6. Zadorozhny V.G., Gretschev V. Ob optimal'nom linejnomy regulyatore so sluchajno izmenyayushchejsya strukturoj [On an optimal linear regulator with a randomly changing structure]. *Vestnik VGU, seriya: sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii*, 2011, no. 1, pp. 15–21. (in Russian)
  7. Åström K.J., and Hägglund T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning* (2nd edition), NC, Instrument Society of America, 1995.
  8. Yandul'skij A.S., Marchenko A.A., Homenko O.V., Macejko V.V. Increase of efficiency of work of the central regulator sarchp in regulating the frequency of the power flows in the OES of Ukraine. *Visnik chernigivskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, 2013, vol. 67, no. 3, pp. 233–238. (in Ukrainian)
  9. Yandul'skij A.S., Marchenko A.A., Homenko O.V., Macejko V.V. Optimization of Parameters in the System Controller for Automatic Control of Frequency and Active Power in Ukraine Power System. *Naukovi praci DonNTU. Seriya: "Elektrotekhnika i energetika"*, 2013, vol. 15, no. 2, pp. 294–298. (in Ukrainian)
  10. Feldbaum A.A. *Osnovy teorii optimalnyh sistem* [Fundamentals of the theory of optimal systems]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 624 p.