

УДК 681.3 (075.8)

Н.В. Ростов

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ
И ДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

N.V. Rostov

**MULTIOBJECTIVE PARAMETER OPTIMIZATION
OF DIGITAL CONTROLLERS WITH REGARD TO THE INFLUENCE
OF NONLINEARITIES AND EXTERNAL DISTURBANCES**

Предложена методика многокритериальной компьютерной настройки параметров цифровых регуляторов в системах стабилизации и следящих системах с электромеханическими объектами управления в различных динамических режимах с учетом нелинейностей и при действии внешних возмущений. Приведены примеры настройки параметров типовых цифровых регуляторов в контурах позиционной следящей системы.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ; ЦИФРОВЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ; МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ; ПРЯМОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ; ПАРЕТО-РЕШЕНИЯ; НЕЛИНЕЙНОСТИ; ВНЕШНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ.

Some formulations and computer-aided technologies for multiobjective parameter optimization of digital stabilization and tracking control systems with electromechanical plants are proposed, taking into account nonlinearities and disturbances in different dynamical modes. The practical examples are given to multiobjective parameter tuning of typical digital controllers.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS; DIGITAL CONTROLLERS; MULTIOBJECTIVE PARAMETER OPTIMIZATION; DIRECT SOUNDING; PARETO-SOLUTIONS; NONLINEARITIES; DISTURBANCES.

В многоконтурных микропроцессорных системах автоматического управления (САУ), таких как системы стабилизации скорости и позиционные следящие системы, широко применяются цифровые регуляторы низкого порядка ПИ, ПД и ПИД-типа. Их линейный параметрический синтез обычно проводится аналитически, начиная с внутреннего контура, по выражениям, обеспечивающим настройку переходных процессов в контурах момента (или тока), скорости и положения по модульно-

му, симметричному или другим критериям оптимальности [1]. Однако при компьютерном проектировании таких САУ с использованием нелинейных моделей контуров расчетные значения параметров регуляторов приходится корректировать. При этом целесообразно осуществлять многокритериальную (МК) компромиссную настройку регуляторов из-за противоречивости частных критериев – интегральных и прямых показателей динамических процессов, оцениваемых в основных режимах работы кон-

туров при входных и возмущающих воздействиях разных видов.

В статьях [3, 4] предложены методики МК-оптимизации последовательных и модальных цифровых регуляторов высокого порядка на основе косвенного зондирования, совмещенного с алгебраическим синтезом и анализом устойчивости на сетке полюсов линейной дискретной модели системы и оцениванием частных критериев по результатам нелинейного моделирования САУ. В статье [5] изложена методика последовательной (поэтапной) МК-оптимизации цифровых САУ с предварительной итерационной скалярной оптимизацией САУ на начальных этапах для локализации Парето-области и проведением в ограниченной ее окрестности прямого зондирования пространства параметров регулятора.

В предлагаемой ниже практической методике МК-настройка параметров цифровых регуляторов проводится на основе *многорежимного зондирования динамики* с оцениванием показателей переходных и установившихся процессов по результатам дискретно-непрерывного моделирования цифровых САУ при разных видах входных воздействий с учетом присущих реальным системам нелинейностей, а также при действии внешних возмущений. Применение методики иллюстрируется на примерах МК-настройки параметров цифровых регуляторов в контурах следящей системы со

статическими и астатическими объектами управления (ОУ).

Дискретно-непрерывные модели цифровых САУ. На обобщенной структурной схеме цифровой САУ (рис. 1) обозначены: НЧ – непрерывная часть системы (объект управления); ДЧ – дискретная часть; ЦР, ЦК – цифровой регулятор и компенсатор; АЦП, ЦАП – аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи; ЭЗ – элемент временного запаздывания; Э₀ – экстраполятор нулевого порядка; T₀ – период квантования сигналов по времени; НЭ₁, НЭ₂ – нелинейные элементы, учитывающие квантование по уровню входного воздействия g[n] и сигнала обратной связи y[n]; НЭ₃ – нелинейный элемент, учитывающий квантование по уровню и ограничение цифрового сигнала управления u[n]; f(t) – внешнее возмущение.

В моделях электромеханических ОУ необходимо учитывать падение напряжения на выходе силового преобразователя и на щетках двигателя, трение и момент нагрузки на валу двигателя, люфт в механической передаче.

Постановки задач МК-оптимизации цифровых САУ. В зависимости от целевого назначения системы векторные критерии могут составляться из различных пар частных критериев $F_i(\theta) = [f_1, f_2]^T$, зависящих от значений θ – вектора настраиваемых параметров регулятора.

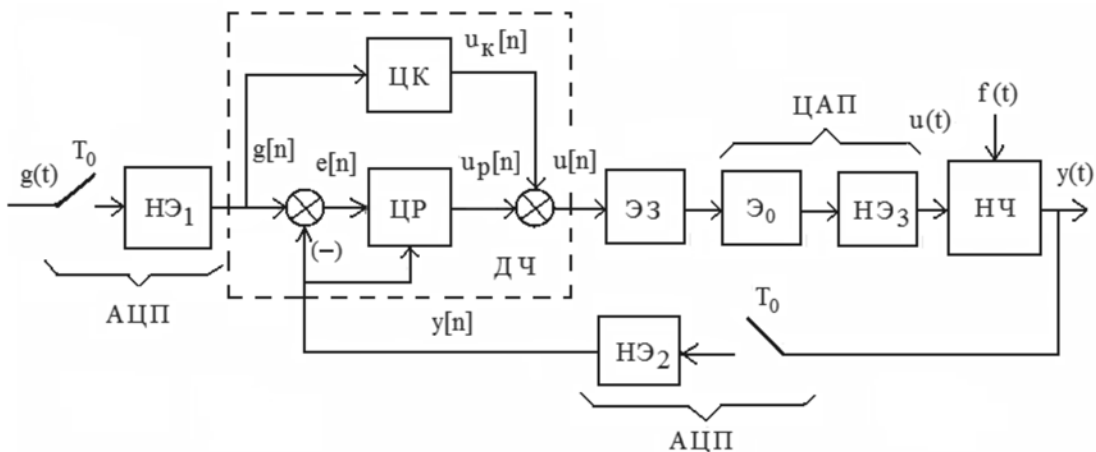


Рис. 1. Структурная схема цифровой системы

Для систем любого класса должны оцениваться прямые показатели переходного процесса по входному воздействию:

$$F_1(\theta) = [T_g, \sigma]^T \rightarrow \min, \quad (1)$$

где T_g – время переходного процесса; σ – перерегулирование.

Но в случаях сильно колебательной или расходящейся переходной характеристики САУ они не могут быть определены по результатам моделирования.

Векторный критерий может включать в себя интегральные квадратичные оценки переходного процесса произвольного вида, вычисляемые в дискретном времени:

$$F_2(\theta) = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N e^2[n], \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N u^2[n] \right] \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $e[n] = (g[n] - y[n])$ – ошибка системы; $u[n]$ – управляющее воздействие; N – число периодов дискретности протекания переходного процесса. Первый частный критерий косвенно оценивает быстродействие САУ, а второй – энергозатраты на управление.

Векторный критерий может содержать также интегральную оценку производной выходной переменной системы, характеризующую ее колебательность:

$$F_3(\theta) = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N e^2[n], \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 dt \right] \rightarrow \min, \quad (3)$$

где T – время протекания динамического процесса.

Для систем стабилизации момента или скорости векторный критерий должен содержать оценки показателей инвариантности, определяемых при действии ступенчатого внешнего возмущения:

$$F_4(\theta) = [T_f, |e_f|_{\max}]^T \rightarrow \min, \quad (4)$$

где T_f – время переходного процесса по возмущению; $|e_f|_{\max}$ – соответствующая максимальная динамическая ошибка.

Для позиционных следящих систем векторный критерий должен включать в себя оценки точностных показателей, определяемых при гармоническом входном воздействии:

$$F_5(\theta) = \left[\frac{1}{K_v}, E_{sq} \right]^T \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $E_{sq} = \sqrt{\left(1 / N \sum_1^N e^2[n] \right)}$ – среднеквадратичная динамическая ошибка; K_v – добротность по скорости.

Для оценивания указанных выше критериев необходимо проводить зондирование динамики цифровой САУ с моделированием в следующих трех режимах:

- при ступенчатом входном воздействии $g[n]$ и нулевом внешнем возмущении $f(t)$;
- при действии ступенчатого внешнего возмущения $f(t)$;
- при гармоническом воздействии $g[n] = g_m \sin(\omega \cdot nT_0)$, при этом

$$K_v = (g_m \cdot \omega) / |e[n]|_{\max}.$$

В конкретных практических задачах МК-оптимизации полный векторный критерий может формироваться из разных комбинаций пар частных критериев (1)–(5) в соответствии с классом САУ.

МК-оптимизация регуляторов трехконтурной следящей системы. *Настройка цифрового ПИ-регулятора тока.* На рис. 2 представлена схема Simulink-модели циф-

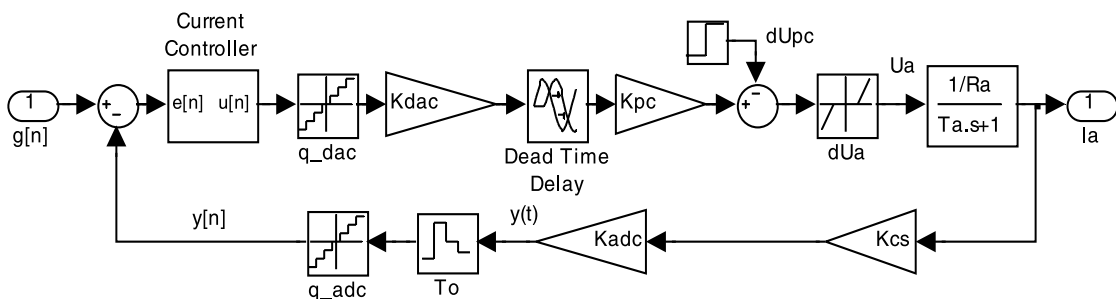


Рис. 2. Simulink-модель контура тока

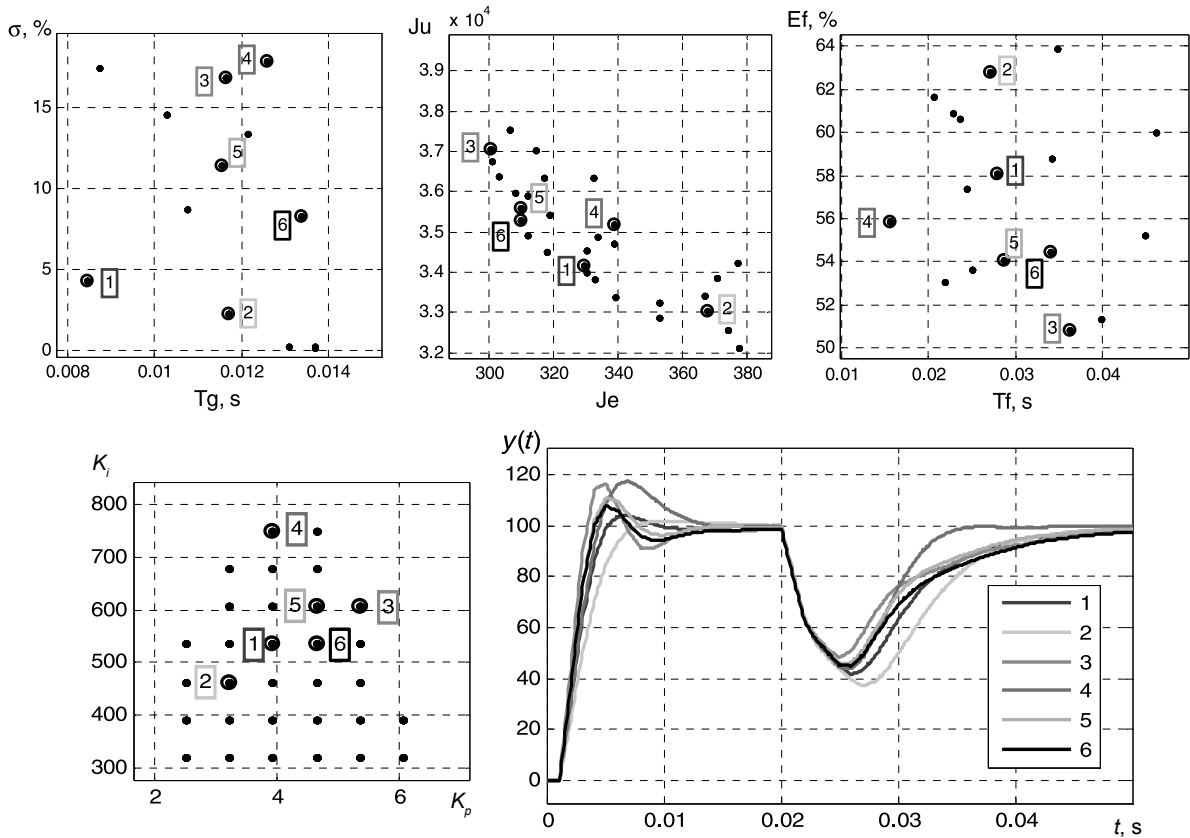


Рис. 3. Результаты зондирования и варианты настройки ПИ-регулятора тока

рового контура тока, в нелинейной модели статического ОУ которого учитываются падение напряжения якоря на щетках двигателя постоянного тока dU_a (dead zone) и временное запаздывание (dead time delay) силового преобразователя (power converter). Внешним возмущением является падение напряжения на выходе силового преобразователя dU_{pc} .

Для оптимизации электромагнитных переходных процессов в контуре тока проведено прямое зондирование в пространстве двух параметров (K_p , K_i) с оцениванием критериев (F_1, F_2, F_4). Результаты зондирования представлены на рис. 3, где выделены узлы для шести вариантов настроек параметров ПИ-регулятора тока и приведены кривые соответствующих пере-

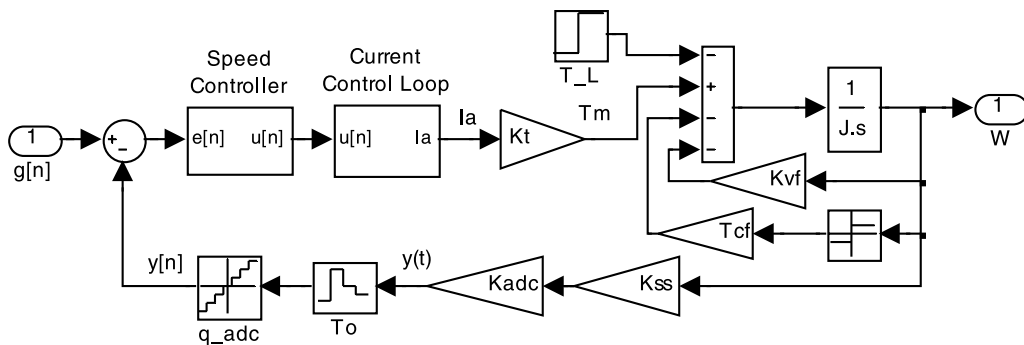


Рис. 4. Simulink-модель контура скорости

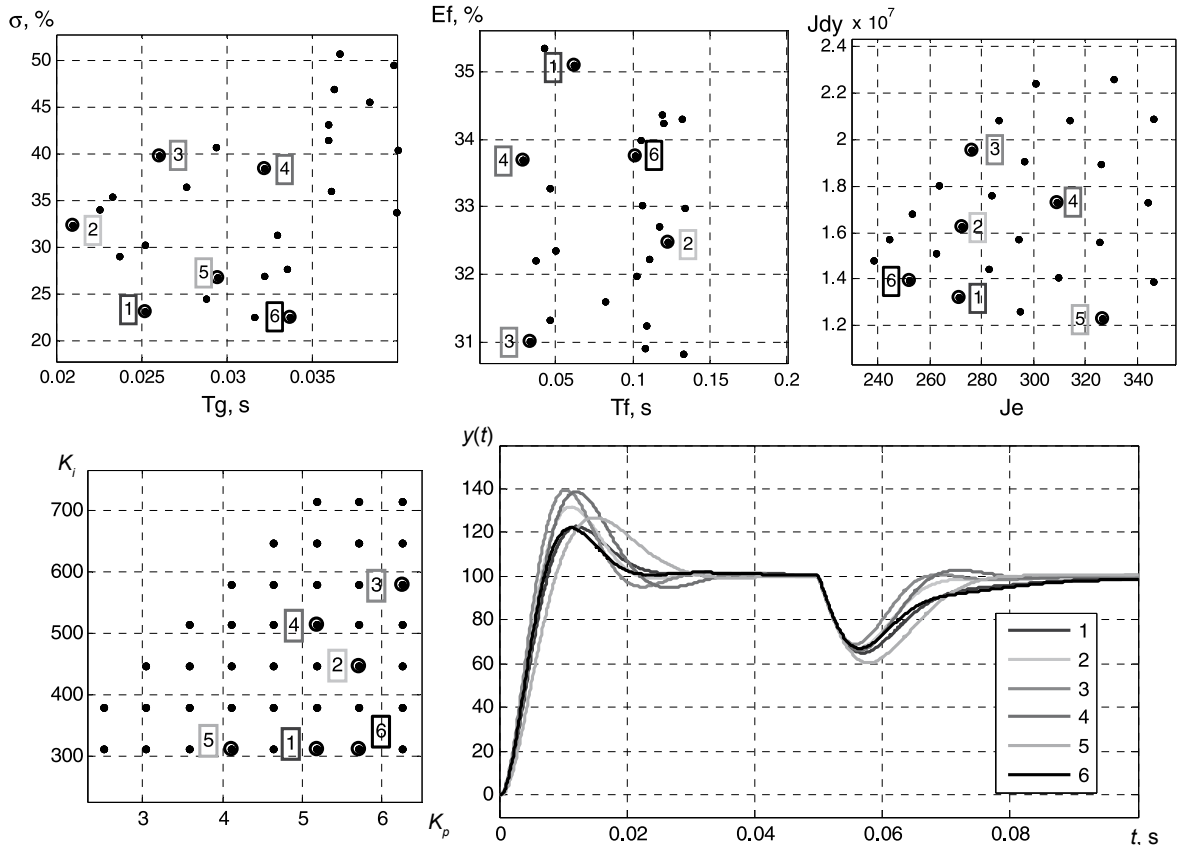


Рис. 5. Результаты зондирования и варианты настройки ПИ-регулятора скорости

ходных процессов.

Полученные варианты настроек противоречивы. Они являются Парето-оптимальными решениями, но по разным критериям: 1 и 2 — по критерию F_1 ; 3 и 4 — по критерию F_4 ; 5 и 6 — по критерию F_2 .

Настройка цифрового ПИ-регулятора скорости. На рис. 4 представлена схема Simulink-модели цифрового контура скорости, в нелинейной модели ОУ которого учитывается вязкое и сухое трение на валу двигателя (K_v, T_{cf}). Внешним возмущением является момент нагрузки T_L .

Для оптимизации электромеханических переходных процессов в контуре скорости необходимо прямое зондирование в пространстве двух параметров (K_p, K_i) с оценением критериев (F_1, F_3, F_4). Результаты зондирования представлены на рис. 5, где выделены узлы для шести вариантов настроек параметров ПИ-регулятора скорости

и приведены кривые соответствующих переходных процессов.

Выбранные варианты настроек являются Парето-оптимальными по разным парам критериев: 1 и 2 — по критерию F_1 ; 3 и 4 — по критерию F_4 ; 5 и 6 — по критерию F_3 .

Настройка цифрового ПИД-регулятора положения. На рис. 6 представлена схема Simulink-модели цифрового контура положения с астатическим нелинейным ОУ, в модели которого учитывается люфт в редукторе (backlash). Внешнее возмущение имитируется резким снижением скорости двигателя dW при ступенчатых моментах нагрузки.

Для оптимизации механических переходных процессов в контуре положения необходимо прямое зондирование в пространстве трех параметров (K_p, K_i, K_d) с оценением критериев (F_1, F_5, F_3) в соответствующих режимах. Для упрощения

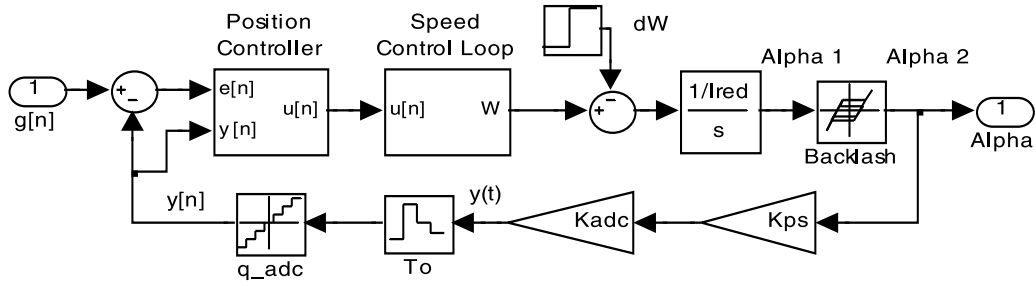


Рис. 6. Simulink-модель контура положения

на рис. 7 представлены результаты зондирования в пространстве только двух параметров (K_p , K_i) а третий параметр K_d задавался постоянным. Для выделенных трех вариантов настроек параметров ПИД-регулятора положения приведены кривые соответствующих переходных и установившихся процессов.

Выбранные варианты настроек являются Парето-оптимальными: 1 – по критерию F_1 ;

2 – по критерию F_5 ; 3 – по критерию F_3 .

По результатам оптимизации контуров тока, скорости и положения можно сформулировать следующие важные утверждения.

Утверждение 1. Настройка ПИ-регулятора тока по показателям переходного процесса при ступенчатом входном воздействии, близким к модульному критерию ($\sigma = 4,3\%$), энергетически также выгодна,

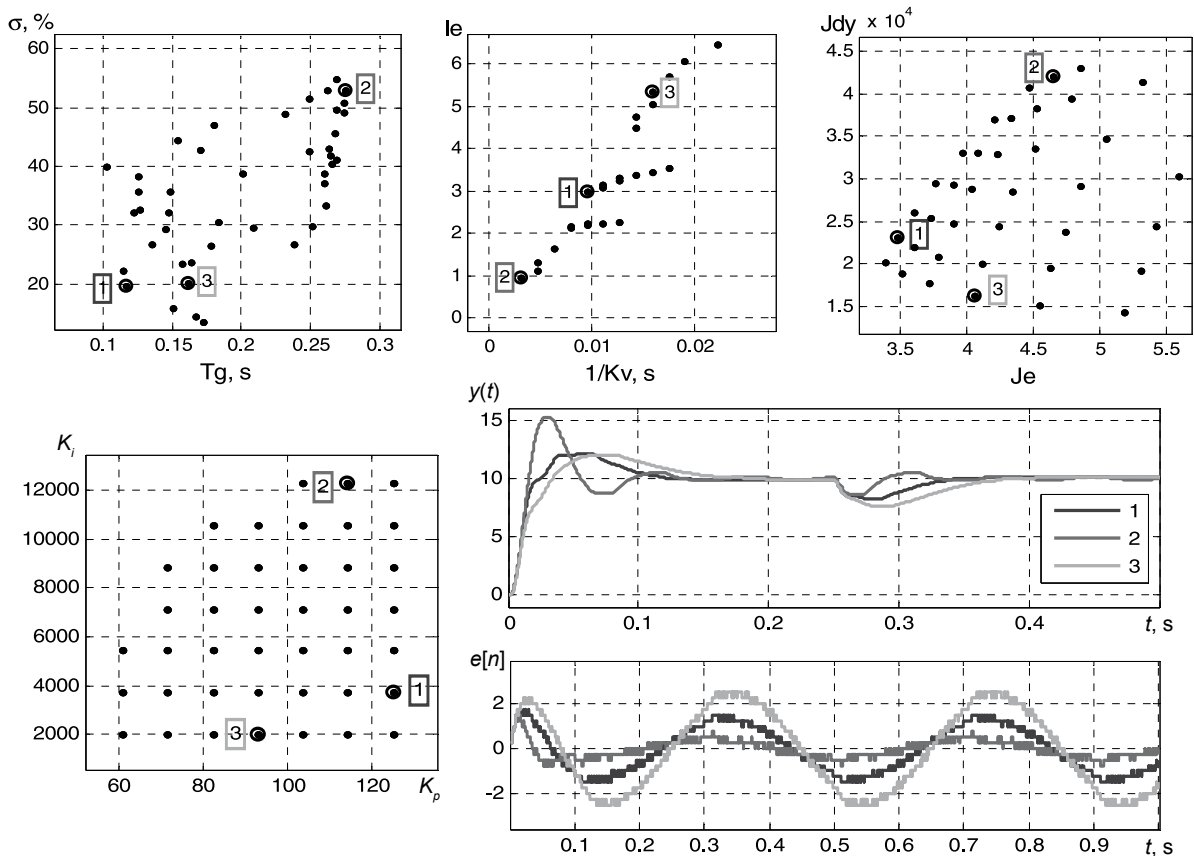


Рис. 7. Результаты зондирования и варианты настройки ПИД-регулятора положения



но не является Парето-оптимальной по показателям переходного процесса при ступенчатом возмущающем воздействии.

Утверждение 2. Настройка ПИ-регулятора скорости по показателям переходного процесса при ступенчатом входном воздействии, близким к симметричному критерию ($\sigma = 43\%$), является Парето-оптимальной по показателям при ступенчатом возмущающем воздействии.

Утверждение 3. Настройка ПИД-регулятора положения по критериям максимального быстродействия и наименьшего перерегулирования переходного процесса при ступенчатом входном воздействии не является Парето-оптимальной по показателям переходного процесса при ступенчатом возмущающем воздействии. Высокая добротность K_v контура положения при гармоническом входном воздействии обеспечивается настройкой переходного процесса при ступенчатом входном воздействии на большое перерегулирование ($\sigma = 50\%$).

Эти утверждения сделаны на основе эмпирического анализа результатов зондирования нелинейных цифровых контуров и приведены здесь без строгих доказательств, но они не противоречат известным положениям теории электропривода и линей-

ной теории управления [1, 2]. В случаях существенного влияния нелинейностей (при малых уровнях сигналов) их справедливость на практике целесообразно проверять путем компьютерного моделирования или физическими экспериментами.

По изложенной выше методике можно сделать следующее заключение.

Парето-оптимальные параметры регуляторов потенциально обеспечивают наилучшие показатели САУ, поэтому их поиск по результатам многорежимного зондирования является практически важной задачей. При этом векторные критерии должны формироваться в соответствии с классами САУ и учетом приоритетов их показателей. В отличие от скалярной оптимизации по интегральному критерию с субъективно задаваемыми весовыми коэффициентами МК-оптимизация позволяет более объективно принимать компромиссные, технически рациональные решения по настройке параметров регуляторов.

Предложенная методика имеет общий характер, т. к. она может применяться при МК-настройке не только типовых цифровых регуляторов, но и цифровых САУ с более сложными структурами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: учеб. для вузов. СПб.: Энергоатомиздат, СПбО, 1994.
2. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления // Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб. в 3 т. Т. 2. Под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
3. Ростов Н.В. Параметрическая оптимизация цифровых модальных регуляторов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во

СПбГПУ, 2010. № 3(101). С. 39–45.

4. Ростов Н.В. Синтез и компьютерная оптимизация цифровых последовательных регуляторов высокого порядка // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. № 4(103). С. 53–58.

5. Ростов, Н.В. Последовательная многокритериальная оптимизация регуляторов нелинейных систем автоматического управления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. № 6(113). С. 44–50.

REFERENCES

1. Kovchin S.A., Sabinin Yu.A. *Teoriia elektroprivoda: uchebnik dlia vuzov*. St. Petersburg: Energoatomizdat, SPbO Publ., 1994. (rus)
2. Sintez regulatorov i teoriia optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniia, *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo uprav-*

leniia: uchebnik v 3 t. T. 2. Pod red. N.D. Egupova. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2000. (rus)

3. Rostov N.V. Parametricheskaiia optimizatsiia tsifrovyykh modal'nykh regulatorov, *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekom-*

munikatsii. Upravlenie, St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2010, No. 3(101), Pp. 39–45. (rus)

4. **Rostov N.V.** Sintez i komp'iuternaia optimizatsiia tsifrovyykh posledovatel'nykh regulatorov vysokogo poriadka. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2010,

No. 4.(103) Pp. 53–58. (rus)

5. **Rostov N.V.** Posledovatel'naia mnogokriterial'naia optimizatsiia regulatorov nelineinykh sistem avtomaticheskogo upravleniia, *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2010. No. 6(113). Pp. 44–50. (rus)

РОСТОВ Николай Васильевич – доцент кафедры систем и технологий управления Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: rostovnv@mail.ru

ROSTOV, Nikolay V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: rostovnv@mail.ru