

УДК 621.3.078.4

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-57-64

Сравнение линейных алгоритмов управления положением для прямых сервоприводов

Е.К. Самыгина, Л.Н. Рассудов, А.П. Балковой

Прямые сервоприводы используются в промышленных установках, требующих высокой динамики и точности перемещения. Построение системы управления играет ключевую роль для достижения требуемых точностных и динамических показателей сервопривода.

Рассмотрены две базовые линейные структуры управления положением прецизионного сервопривода: структура с ПИД-регулятором положения, а также с П-регулятором положения и вложенным контуром скорости с ПИ-регулятором. Выполнен анализ с учетом возможности их дополнения фильтрами, наблюдателями и предикторами. Результаты симуляции, а также эксперимента на базе вращательного прецизионного сервопривода показали, что при точно известных параметрах системы структуры позволяют обеспечить сопоставимую точность перемещений. Для этого выведены уравнения перерасчета настроек из одной структуры в другую (для аналоговых и цифровых систем). При вариации параметров системы структура с ПИД-регулятором положения обеспечивает высокую траекторную точность и требует наименьшее количество вычислений, что делает предпочтительным её использование в системах управления высокоточными сервоприводами. Показано, что достижение сравнимых показателей в системе подчиненного регулирования возможно за счет использования предиктора Смита.

Ключевые слова: прецизионный электропривод, сервопривод, синтез систем управления, замкнутые системы управления, регулирование положения, прямые программные связи, наблюдатели координат.

Для цитирования: Самыгина Е.К., Рассудов Л.Н., Балковой А.П. Сравнение линейных алгоритмов управления положением для прямых сервоприводов // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 57—64. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-57-64.

Comparison of the Linear Position Control Algorithms for Direct Servo Drives

Е.К. Samygina, L.N. Rassudov, A.P. Balkovoi

Direct servo drives are used in industrial installations that place high demands for the motion dynamic and precision characteristics. Proper control system design is the key factor in achieving the required servo drive accuracy and dynamic performance characteristics.

Two basic linear control structures for controlling a precision servo drive's position are considered: the structure with a PID position controller and the structure with a P position controller and a nested speed loop with a PI controller. The structures were analyzed with taking into account the possibility of supplementing them with filters, observers, and predictors. The results of simulation and experiment carried out on the basis of a rotary precision servo drive have shown that the control structures are able to ensure commensurable motion accuracy provided that the system parameters are known exactly. To this end, equations for recalculating the tunings from one structure to another are derived for analog and digital systems. With variable system parameters, the structure with a PID position controller ensures high tracking accuracy and requires the minimal computation effort, a circumstance that makes its use preferable in high-precision servo drive control systems. It is shown that commensurable performance characteristics in a subordinated control system can be achieved by using a Smith predictor.

Key words: precision electric drive, servo drive, control system synthesis, closed-loop control systems, position control, software feed-forwards, coordinate observers.

For citation: Samygina E.K., Rassudov L.N., Balkovoi A.P. Comparison of the Linear Position Control Algorithms for Direct Servo Drives. Bulletin of MPEI. 2019;2:57—64. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-57-64.

Введение

В современном машиностроении для прецизионной обработки материалов (шлифовки, лазерной резки, электроэрозионной обработки) широко применяются электроприводы с жестким соединением рабочего органа и электрической машины (прямые, безредукторные приводы). В их состав, как правило, входят синхронные машины с постоянными магнитами (СМППМ) в режиме вентильного двигателя (ВД) [1]. Постоянно растущие требования к динамике и точности перемещений сервопривода в режиме воспроизведения траектории вынуждают совершенствовать все компоненты.

Улучшение характеристик привода за счет модернизации его системы управления (СУ) требует минимальных капитальных затрат, по этой причине исследованию СУ уделяется много внимания [2 — 5].

Несмотря на увеличение вычислительной мощности блоков управления приводом за счет развития информационных технологий, проблема дефицита процессорного времени чрезвычайно актуальна при усовершенствовании СУ с целью повышения траекторной точности и снижения чувствительности к зашумлению сигналов, потому выбор структур управления координатами привода особенно важен при разработке СУ сервопривода [6, 7].

В настоящее время известно множество различных структур управления координатами привода: линейные, нейронные сети, основанные на нечеткой логике и т. д. Линейные структуры широко используются для управления положением приводов со стабильными, предсказуемыми или наблюдаемыми параметрами. К стандартным линейным структурам, формирующим задание момента, относятся ПИД-регулятор положения и структура подчиненного регулирования с П-регулятором положения и ПИ-регулятором скорости [2, 3]. Применение ПИД-регулятора в аналоговых СУ нежелательно из-за наличия дифференцирующего звена [8]. Для современных цифровых систем это не вполне справедливо, что объясняет повышенный интерес к использованию ПИД-регулятора и его модификаций в современных СУ [2, 9 — 11].

Большое число исследований посвящено как усовершенствованию линейных СУ с помощью динамических моделей, фильтров, наблюдателей, предикторов [2, 3], так и их оптимальной настройке [4, 5]. Исследованы нелинейные СУ в сравнении с линейными [9, 10, 12]. Так, Luis Ru-bio, Asier Ibeas и Xichun Luo предлагают структуру регулирования координат в скользящем режиме и сравнивают ее со структурой подчиненного регулирования [12]. Vahedpour, Noei и Kholerdi сравнивают ПИД-регуляторы дробного порядка с основанными на нечеткой логике [9]. Lin и Peng сопоставляют СУ СМПП на основе нейронной сети и СУ с ПИД-регулятором [10]. Лишь в нескольких работах представлено сравнение линейных СУ между собой [2, 11]. Исследований, посвященных влиянию типа линейной структуры регулирования положения на траекторную точность в условиях дискретизации и зашумления сигналов обратных связей (ОС), а также вариации параметров привода, найдено не было.

Настоящая работа посвящена анализу линейных СУ дополненных фильтрами, наблюдателями и предикторами с учетом затрат вычислительных ресурсов

и условий эксплуатации. Результаты исследования позволят выявить линейную структуру регулирования, обеспечивающую наилучшие точностные характеристики при наименьших затратах процессорного времени.

Представлена общая структура СУ сервопривода, дано теоретическое описание и проведено сравнение структур с ПИД-регулятором положения и подчиненным регулированием. Представлены результаты симуляции и эксперимента, а также даны рекомендации по выбору линейных структур управления положением прямого сервопривода.

Система управления сервопривода

Типовая структура СУ сервопривода с вращающейся СМПП представлена на рис. 1. Вектор задания координат $(\theta^*, \omega^*, T^*)$, состоящий из заданий положения, скорости и ускорения, формируется генератором траекторий (ГТ) [13]. Задание тока $(I_d^*$ и $I_q^*)$ рассчитывается задатчиком тока (ЗТ). Динамическая модель [7] формирует прямые программные связи по напряжению (U_{d_FF}, U_{q_FF}) , компенсирующие перекрестные связи и статическую противо-ЭДС. Для повышения траекторной точности [14] и уменьшения пульсаций скорости [15] могут использоваться калибровочные таблицы положения $\theta_{corr}(\theta)$ и момента $T_{cog}(\theta)$.

Управление координатами привода осуществляется с помощью регулятора тока (РТ) и структуры управления положением, формирующей сигнал коррекции задания момента (T_{VR}) . Система измерения тока и положения совместно с координатными преобразованиями используются для формирования обратных связей по току и положению $(I_d, I_q$ и $\theta)$.

Представим уравнения математической модели идеализированной неявнополюсной трехфазной СМПП, использованные в СУ для формирования прямых программных связей по динамической модели, а также при построении симуляционной модели привода:

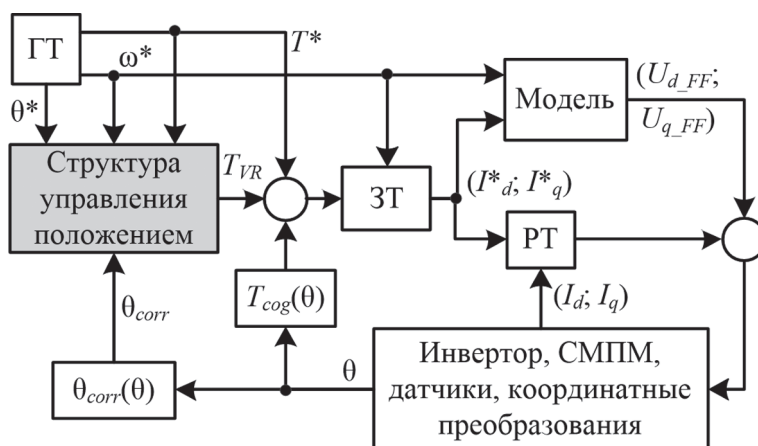


Рис. 1. Структура системы управления сервопривода

$$\begin{cases} U_d = I_d R + L \frac{dI_d}{dt} - \omega p L I_q; \\ U_q = I_q R + L \frac{dI_q}{dt} + \omega (p L I_d + K_{Tph}); \\ T = 1,5 K_{Tph} I_q; \\ T - T_{cog}(\theta) - T_{Cf} - T_{vf}(\omega) - T_L = J_{me} \frac{d\omega}{dt}; \\ U_d^2 + U_q^2 \leq U_m^2; \\ U_d^2 + U_q^2 \leq U_m^2, \end{cases} \quad (1)$$

где R, L — сопротивления и индуктивности статора в осях $d-q$; K_{Tph} — коэффициент момента; p — число пар полюсов; $T, T_{cog}, T_L, T_{Cf}, T_{vf}$ — электромагнитный, зубцовый моменты, момент нагрузки, сухое и вязкое трение; J_{Σ} — момент инерции; $j, \varepsilon, \omega, \theta$ — механические рыбок, ускорение, скорость и положение; I_d, I_q, U_d, U_q — токи и напряжения статора в осях $d-q$; U_m — ограничение амплитуды напряжения; I_p — ограничение амплитуды пикового тока.

При вычислении (1) были сделаны следующие допущения: система линейна, распределение поля в зазоре СМПС синусоидальное, зубцовый момент и сила трения отсутствуют.

Линейные структуры управления положением

Представлено теоретическое исследование вопросов настройки структур управления положением прецизионного сервопривода.

Линейная структура с ПИД-регулятором положения

Структура представляет собой ПИД-регулятор с фильтрацией Д-составляющей и использует разность задания и ОС по положению в качестве входного сигнала. ПИД-регулятор положения с коэффициентами $P_{PID}, I_{PID}, D_{PID}$ изображен на рис. 2. НЧ-фильтр используется для снижения чувствительности Д-составляющей регулятора к шумам в ОС [11, 16]. Частота среза НЧ-фильтра выбирается в соответствии с частотным спектром шумов в ОС и требованиями к динамике регулятора. Рекомендации по настройке структуры с ПИД-регулятором даны в [2, 8, 11, 17 — 19].

Линейная структура управления положением с подчиненным регулированием

Структура подчиненного управления положением в качестве входных сигналов использует сигналы задания положения и скорости, а также сигнал ОС по положению (рис. 3). Для получения ОС по скорости в данной структуре применяют наблюдатель скорости (НС) [3]. В простейшем случае НС представляет собой дифференцирующее звено, однако чаще работают с более сложными структурами [1, 2]. Без использования в НС прямых связей (например, T^* в НС, рис. 4), дающих информацию об ускорении привода, в ОС по скорости будет присутствовать временная задержка.

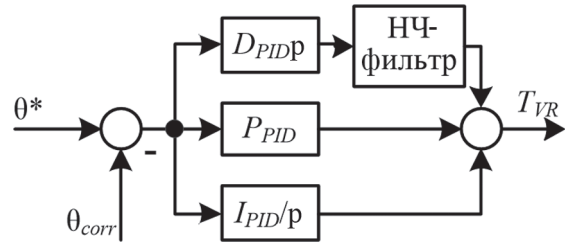


Рис. 2. ПИД-регулятор с НЧ-фильтрацией

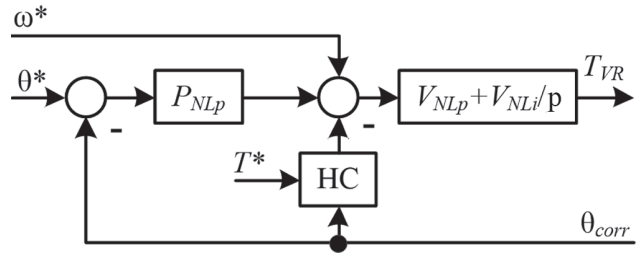


Рис. 3. Классическая структура подчиненного регулирования

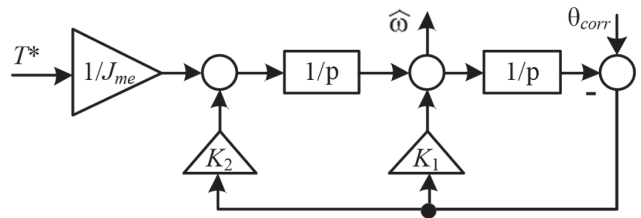


Рис. 4. Наблюдатель скорости

Астатическая ошибка НС (см. рис. 4) зависит от ускорения, рассчитываемого в модели привода, также как и от достоверности информации о моменте инерции J_{me} , меняющемся в течение работы привода.

Одно из преимуществ систем с подчиненным управлением — возможность ограничения задания скорости [8]. Однако в настоящее время это не имеет столь большого значения при работе СУ в следящем режиме, поскольку сигналы задания в таких СУ генерируются с учетом ограничений координат привода. Подробные рекомендации по настройке структуры подчиненного регулирования приведены в [2, 11, 20 — 22].

Линейная структура управления положением с подчиненным регулированием с предиктором Смита

Одним из возможных способов исключения из наблюдателя сигнала задания момента и снижения его чувствительности к вариации параметров привода является использование в прямых программных связях предиктора Смита (ПС) (рис. 5, а), имеющего структуру, идентичную НС. После математического преобразования получается упрощенная структура управления (рис. 5, б).

Коэффициенты регуляторов положения P_{NLP} и скорости (V_{NLP}, V_{NLp}), как и коэффициенты НС (K_1, K_2), настраиваются по алгоритму для классической П-ПИ структуры. Преимущество предложенной структу-

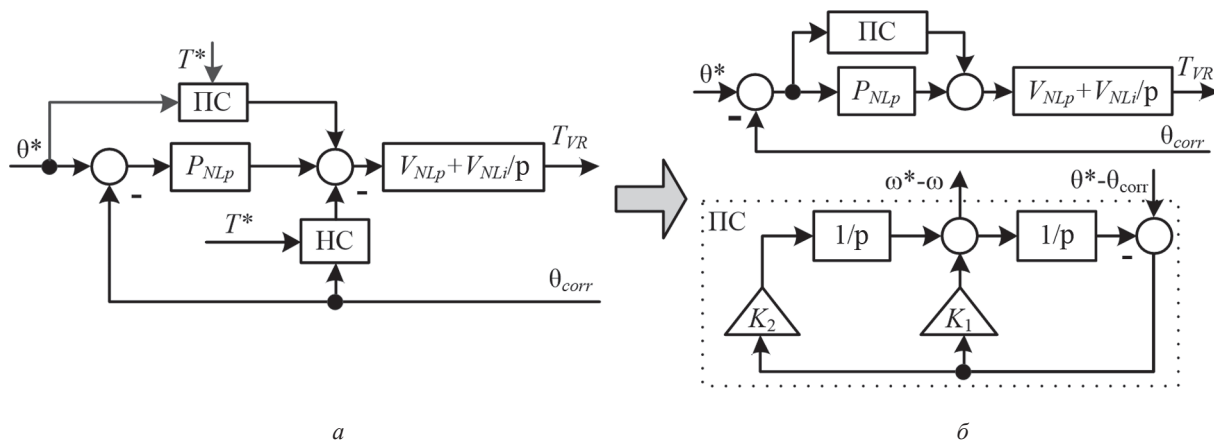


Рис. 5. Структура подчиненного регулирования с предиктором Смита

ры заключается в учете запаздывания в наблюдаемом сигнале без использования сигнала прямой связи T^* , зависящей от информации о моменте инерции J_{me} , в наблюдателе.

Настройка системы управления

Рассматриваемые структуры управления координатами могут быть настроены на одинаковую желаемую ширину полосы пропускания по положению. Алгоритм настройки структуры подчиненного регулирования положения широко известен и детально описан в [2, 11, 19]. Если задаться ПС-дифференцирующим звеном, то коэффициенты структуры управления с подчиненным регулированием связаны с коэффициентами ПИД-регулятора уравнениями:

$$\begin{cases} P_{PID} = P_{NLp} V_{NLp} + V_{NLi}; \\ I_{PID} = P_{NLp} V_{NLi}; \\ D_{PID} = V_{NLp}. \end{cases} \quad (2)$$

В целях оптимизации разностных уравнений регуляторов период дискретизации СУ T_s , как правило, вносится в дискретные коэффициенты (индекс «d») как в структуре с ПИД-регулятором

$$\begin{bmatrix} P_{PID}^d \\ I_{PID}^d \\ D_{PID}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{PID} \\ I_{PID} T_s \\ D_{PID} / T_s \end{bmatrix}, \quad (3)$$

так и в подчиненном регулировании положения

$$\begin{bmatrix} P_{NLp}^d \\ V_{NLp}^d \\ V_{NLi}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{NLp} \\ V_{NLp} \\ V_{NLi} T_s \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Соотношение между коэффициентами регуляторов в дискретном представлении запишем следующим образом:

$$\begin{bmatrix} P_{PID}^d \\ I_{PID}^d \\ D_{PID}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{NLp}^d V_{NLp}^d + V_{NLi}^d / T_s \\ P_{NLp}^d V_{NLi}^d \\ V_{NLp}^d / T_s \end{bmatrix}. \quad (5)$$

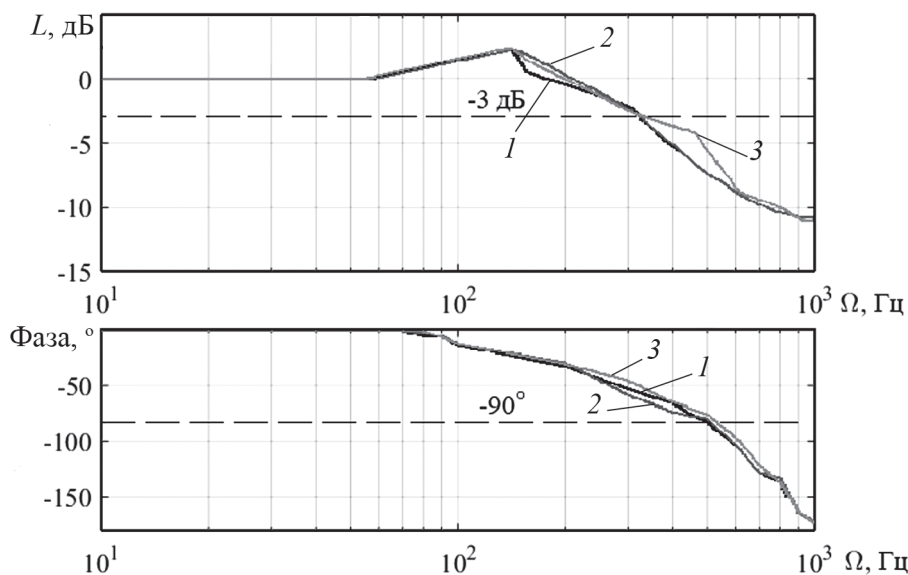


Рис. 6. ЛАФЧХ сервопривода в режиме замыкания по положению:

1 — ПИД-регулятор; 2 — подчиненное регулирование; 3 — подчиненное регулирование с предиктором Смита

В соответствии с (2) — (5) рассматриваемые структуры регулирования положения могут быть настроены на одинаковую ширину полосы пропускания по положению с помощью простого пересчета коэффициентов. Например, структура с ПИД-регулятором может быть настроена с использованием коэффициентов структуры подчиненного регулирования, выбранных по [1, 24]:

$$V_{NLP} = \frac{J_{me}}{a_v T_{\Sigma i}}; V_{NLI} = -\frac{J_{me}}{a_v^2 T_{\Sigma i}^2}; P_{NLP} = \frac{1}{a_p a_v T_{\Sigma i}},$$

где $T_{\Sigma i}$ — суммарная постоянная времени замкнутого контура тока и ОС по скорости.

Таким образом, рассмотренные линейные структуры управления положением будут иметь одинаковую ширину полосы пропускания, однако их устойчивость к зашумлению ОС и изменению параметров привода различается, поскольку используются разные прямые программные связи и блоки фильтрации.

Результаты сравнения

Для сравнения рассматриваемых структур управления положением использовалась симуляционная модель вращающегося сервопривода с СМПС ТМУ44 (длительный момент — 4 Н·м, максимальная скорость — 300 об/мин), разработанная в MatLab Simulink в соответствии с (1) и описанными допущениями [23]. Результаты симуляции подтверждены экспериментальными данными, полученными для ТМУ44 с блоком управления DDU6 при напряжении звена постоянного тока 60 В и 20 кГц ШИМ. В качестве датчика ОС по положению взят оптический энкодер. При симуляции учитывалось зашумление ОС по току (0,05 А) и положению ($2 \cdot 10^{-5}$ мех. рад), полученное на экспери-

ментальном стенде. НЧ-фильтры и наблюдатели настраивались в соответствии с измеренными спектрами шума [24], а рассматриваемые структуры управления координатами в соответствии с ранее описанными принципами. Экспериментальные данные подтверждают, что предложенный метод пересчета настроек обеспечивает одинаковую полосу пропускания по положению (рис. 6), что доказывает справедливость формул (2) — (5).

В качестве критерия сравнения структур управления положением взята траекторная точность при перемещении привода по типовой S-образной траектории третьего порядка [1, 5] (рис. 7).

Результаты симуляции (рис. 8, а) и эксперимента (рис. 8, в) показали, что у всех трех структур идентичные результаты при условии стабильных и точно известных параметров привода. Различия вызваны наличием трения и зубцового момента, которые не учитывались при симуляции.

Результаты симуляции и эксперимента при сниженной в 2 раза прямой связи по моменту T^* изображены рис. 8, б, г, т. е. реальное значение момента инерции привода в 2 раза отличается от заданного в СУ. При этом траекторная точность классической структуры подчиненного регулирования значительно ухудшается, тогда как структура подчиненного регулирования с предиктором Смита и структура с ПИД-регулятором не реагируют на изменение момента инерции, поскольку не используют прямую связь по моменту.

Таким образом, полученные в ходе исследования результаты показали, что все рассмотренные структуры управления механическими координатами позволяют достичь одинаково высокой траекторной точности при условии, что параметры привода стабильны, а коэффициенты СУ после настройки неизменны.

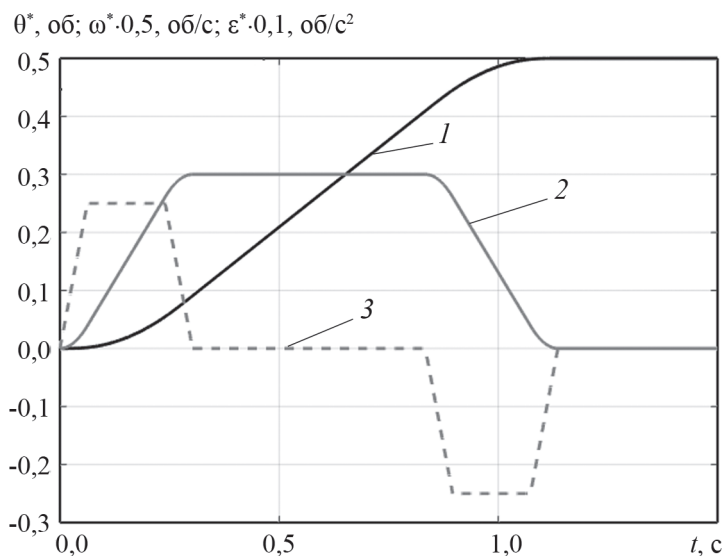


Рис. 7. S-образная траектория:

1 — задание положения; 2 — задание скорости; 3 — задание ускорения

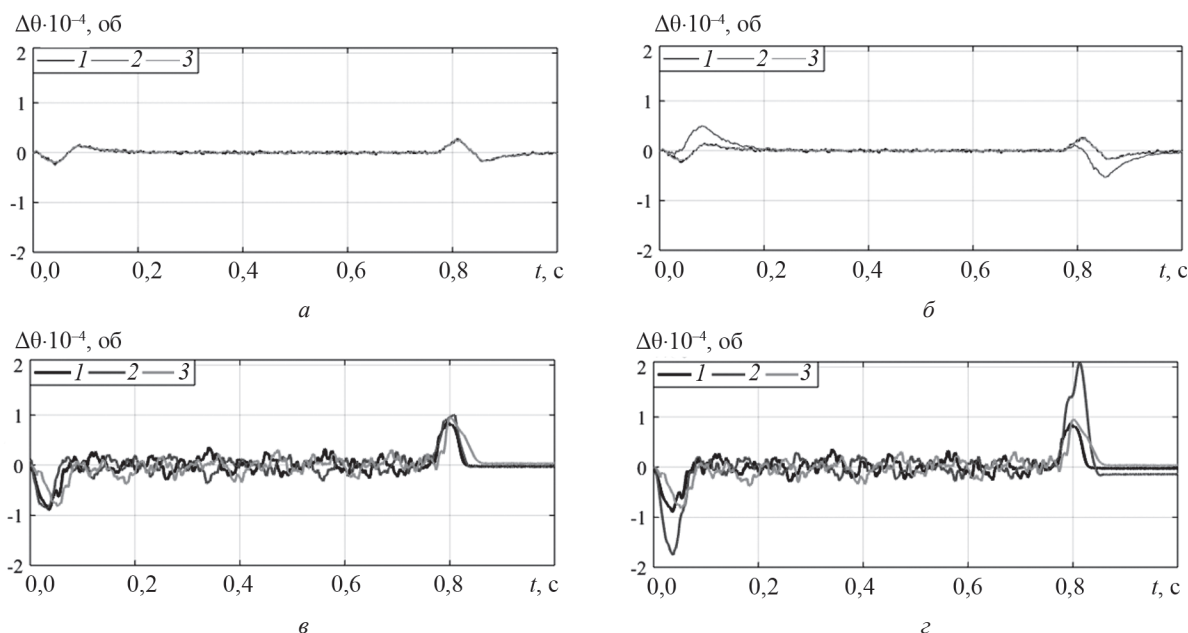


Рис. 8. Траекторная точность:

a, б — симуляция и эксперимент; *в, г* — симуляция и эксперимент при пониженном задании момента; 1 — ПИД-регулятор; 2 — подчиненное регулирование; 3 — подчиненное регулирование с предиктором Смита

Литература

1. Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издат. дом МЭИ, 2010.
2. Kaiser D., Engineer S., Compumotor P., Park R. Fundamentals of Servo Motion Control [Электрон ресурс] <https://www.machinedesign.com/technologies/fundamentals-servo-motion-control> (дата обращения 31.01.2018).
3. Sheikholeslami C., Goers J., Kramer B. Modern Motion Control Strategies Obtain Consistent and Better Performance in Uncertain Conditions. ACS Motion Control, 2010. Pp. 1—8.
4. Денисенко В.А. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66—75.
5. Балковой А.П. Система управления прямого прецизионного электропривода // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Материалы 71 Межрегион. науч.-техн. конф. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013. Т. 2. С. 52—56.
6. Анучин А.С., Балковой А.П., Гуляев И.В. Использование аппаратного ускорителя на базе ПЛИС в системах управления электроприводов // Промышленная энергетика. 2016. № 3. С. 40—43.
7. Rassudov L.N., Balkovoi A.P., Anuchin A.S., Gulyaev I.V. FPGA Implementation of Servodrive Control System // Proc. 57 Intern. Sci. Conf. Power and Electrical Eng. Riga: Riga Technl University, 2016.
8. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Vahedpour M., Noei A.R., Kholerdi H.A. Comparison Between Performance of Conventional, Fuzzy and

References

1. Balkovoy A.P., Tsatsenkin V.K. Pretsizionnyy Elektroprivod s Ventil'nyimi Dvigatelyami. M.: Izdat. Dom MEI, 2010. (in Russian).
2. Kaiser D., Engineer S., Compumotor P., Park R. Fundamentals of Servo Motion Control [Elektron Resurs] <https://www.machinedesign.com/technologies/fundamentals-servo-motion-control> (Data Obrashcheniya 31.01.2018).
3. Sheikholeslami C., Goers J., Kramer B. Modern Motion Control Strategies Obtain Consistent and Better Performance in Uncertain Conditions. ACS Motion Control, 2010:1—8.
4. Denisenko V.A. PID-regulatory: Printsipy Postroeniya i Modifikatsii. Sovremennye Tekhnologii Avtomatizatsii. 2006;4:66—75. (in Russian).
5. Balkovoy A.P. Sistema Upravleniya Pryamogo Pretsizionnogo Elektroprivoda. Aktual'nye Problemy Sovremennoy Nauki, Tekhniki i Obrazovaniya: Materialy 71 Mezhtregion. Nauch.-tekhn. Konf. Magnitogorsk: FGBOU VPO «MG TU», 2013;2:52—56. (in Russian).
6. Anuchin A.S., Balkovoy A.P., Gulyaev I.V. Ispol'zovanie Apparatnogo Uskoritelya na Baze PLIS v Sistemakh Upravleniya Elektroprivodov. Promyshlennaya Energetika. 2016;3:40—43. (in Russian).
7. Rassudov L.N., Balkovoi A.P., Anuchin A.S., Gulyaev I.V. FPGA Implementation of Servodrive Control System. Proc. 57 Intern. Sci. Conf. Power and Electrical Eng. Riga: Riga Technl University, 2016.
8. Klyuchev V.I. Teoriya Elektroprivoda. M.: Energoatomizdat, 1985. (in Russian).
9. Vahedpour M., Noei A.R., Kholerdi H.A. Comparison Between Performance of Conventional, Fuzzy and

Fractional Order PID Controllers in Practical Speed Control of Induction Motor // Proc. II Intern. Conf. Knowledge-based Eng. and Innovation. Teheran, 2015.

10. **Tian Z., Guo H., Ding X., He X.** A PID Neural Network Control for Position Servo System with Gear Box at Variable Load // Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. Hangzhou, 2016.

11. **Gnezdov N.E., Lebedev S.K., Kolganov A.R.** Structural and Parametric Synthesis of Positioning Systems of Electromechatronic Modules // IX Intern. Conf. Power Drives Syst. Perm, 2016. Pp. 1—6.

12. **Rubio L., Ibeas A., Luo X.** P-PI and Super Twisting Sliding Mode Control Schemes Comparison for High-precision CNC Machining // Proc. XXIV Iranian Conf. Electrical Eng. Shiraz, 2016.

13. **Fang H., Xia C., Chen Z., Wei X.** Position Servo Control of Brushless DC Motor Based on the Second Discrete Filter // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Biometrics. Sanya, 2007.

14. **Толстых О.А.** Разработка и исследование калиброванного электропривода с вентильным двигателем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2010.

15. **Рассудов Л.Н. и др.** Калиброванное управление силой вентильного двигателя // Электротехника. 2015. Т. 2. № 2. С. 3—6.

16. **Kolganov A.R., Lebedev S.K., Gnezdov N.E.** Modern control methods in electromechanical systems. Design, realization, application. Ivanovo: ISPU Publ., 2012.

17. **Åström K.J., Hägglund T.** Automatic Tuning of PID Controllers. Pittsburg: Instrument Soc. of America, 1956.

18. **Ashida Y., Wakitani S., Yamamoto T.** Design of a Multivariable Self-tuning PID Controller // Proc. 56 Annual Conf. Society of Instrument and Control Engineers of Japan. Kanazawa, 2017.

19. **Ziegler J.G., Nichols N.B.** Optimum Settings for Automatic Controllers // Trans. of ASME. 1942. V. 64. No. 8. Pp. 759—768.

20. **Seung-Ki Sul.** Control of Electric Machine Drive Systems. New Jersey: Wiley – IEEE Press, 2011.

21. **Vukosavić S.N., Pai M.A., Stanković A.M.** Digital Control of Electrical Drives. N.-Y.: Springer Sci., 2007.

22. **Schmirgel H., Kraß J.O., Goergen H.** Comparison of Auto Tuning Algorithms for the Velocity Loop of Servo Drives // Intern. Exhibition and Conf. for Power Electronics. Intelligent Motion and Power Quality. Nuremberg, 2008.

23. **HIWIN.** Torque Motor (Direct Drive Motor) Technical Information [Электрон. ресурс] www.hiwin.com/pdf/torque_motor_rotary_tables.pdf (дата обращения 27.01.2018).

24. **Tiapkin M., Elenskiy D., Balkovoi A., Tolstykh O.** Control Features of Motion System with Parallel Kinematics // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Eng. St. Petersburg, 2018.

Fractional Order PID Controllers in Practical Speed Control of Induction Motor. Proc. II Intern. Conf. Knowledge-based Eng. and Innovation. Teheran, 2015.

10. **Tian Z., Guo H., Ding X., He X.** A PID Neural Network Control for Position Servo System with Gear Box at Variable Load. Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. Hangzhou, 2016.

11. **Gnezdov N.E., Lebedev S.K., Kolganov A.R.** Structural and Parametric Synthesis of Positioning Systems of Electromechatronic Modules. IX Intern. Conf. Power Drives Syst. Perm, 2016:1—6.

12. **Rubio L., Ibeas A., Luo X.** P-PI and Super Twisting Sliding Mode Control Schemes Comparison for High-precision CNC Machining. Proc. XXIV Iranian Conf. Electrical Eng. Shiraz, 2016.

13. **Fang H., Xia C., Chen Z., Wei X.** Position Servo Control of Brushless DC Motor Based on the Second Discrete Filter. Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Biometrics. Sanya, 2007.

14. **Tolstykh O.A.** Razrabotka i Issledovanie Kalibrovannogo Elektroprivoda s Ventil'nym Dvigatel'em: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: MEI, 2010. (in Russian).

15. **Rassudov L.N. i dr.** Kalibrovannoe Upravlenie Siloy Ventil'nogo Dvigatelya. Elektrotekhnika. 2015;2;2: 3—6. (in Russian).

16. **Kolganov A.R., Lebedev S.K., Gnezdov N.E.** Modern control methods in electromechanical systems. Design, realization, application. Ivanovo: ISPU Publ., 2012.

17. **Åström K.J., Hägglund T.** Automatic Tuning of PID Controllers. Pittsburg: Instrument Soc. of America, 1956.

18. **Ashida Y., Wakitani S., Yamamoto T.** Design of a Multivariable Self-tuning PID Controller. Proc. 56 Annual Conf. Society of Instrument and Control Engineers of Japan. Kanazawa, 2017.

19. **Ziegler J.G., Nichols N.B.** Optimum Settings for Automatic Controllers. Trans. of ASME. 1942;64;8: 759—768.

20. **Seung-Ki Sul.** Control of Electric Machine Drive Systems. New Jersey: Wiley – IEEE Press, 2011.

21. **Vukosavić S.N., Pai M.A., Stanković A.M.** Digital Control of Electrical Drives. N.-Y.: Springer Sci., 2007.

22. **Schmirgel H., Kraß J.O., Goergen H.** Comparison of Auto Tuning Algorithms for the Velocity Loop of Servo Drives. Intern. Exhibition and Conf. for Power Electronics. Intelligent Motion and Power Quality. Nuremberg, 2008.

23. **HIWIN.** Torque Motor (Direct Drive Motor) Technical Information [Elektron Resurs] www.hiwin.com/pdf/torque_motor_rotary_tables.pdf (Data Obrashcheniya 27.01.2018).

24. **Tiapkin M., Elenskiy D., Balkovoi A., Tolstykh O.** Control Features of Motion System with Parallel Kinematics. IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Eng. St. Petersburg, 2018.

Сведения об авторах:

Самыгина Елизавета Кирилловна — аспирант кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: SamyginaYK@mpei.ru

Рассудов Лев Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: RassudovLN@mpei.ru

Балковой Александр Петрович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: BalkovoyAP@mpei.ru

Information about authors:

Samygina Elizaveta K. — Ph.D.-student of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: SamyginaYK@mpei.ru

Rassudov Lev N. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: RassudovLN@mpei.ru

Balkovoy Aleksandr P. — Ph.D. (Techn.), Leading Researcher of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: BalkovoyAP@mpei.ru

Работа выполнена при поддержке: РФФИ (проект № 18-38-00357)

The work is executed at support: RFBR (project No. 18-38-00357)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 03.04.2018

The article received to the editor: 03.04.2018