

УДК 681.515

**Д.А. Даденков, Д.В. Шильяев**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СИСТЕМ  
РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ МИКРОПРИВОДОВ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

В результате исследования определялись оптимальные настройки систем регулирования скорости в одноконтурной и двухконтурной системах автоматического управления микроприводами постоянного тока. Для решения исследовательских задач использован лабораторный программно-аппаратный комплекс, аппаратная часть которого состоит из рабочей станции NI ELVIS II и платы с микроприводами постоянного тока, а программное обеспечение разработано в среде графического программирования NI LabVIEW. В работе предложены структурные схемы системы автоматического регулирования (САР) скорости для лабораторного стенда. Выделено и проанализировано несколько различных методов синтеза регуляторов. В ходе исследований выполнен расчёт коэффициентов регулятора скорости, проведены испытания системы управления на стенде, сняты графики переходных процессов САР скорости. По результатам исследований выполнена оценка качества регулирования скорости по основным показателям и сделаны выводы о возможности использования методов синтеза на практике. Работа выполнена в соответствии с государственным заданием (заказ-наряд 1047) по теме «Создание мобильной интеллектуальной платформы на базе технологии виртуальной реальности, элементов и систем управления, пригодных для эксплуатации в экстремальных условиях внешней среды».

**Ключевые слова:** система автоматического регулирования скорости, микроприводы постоянного тока, лабораторный программно-аппаратный комплекс, методы синтеза регуляторов, переходные процессы, оценка показателей качества регулирования.

**D.A. Dadenkov, D.V. Shilyaev**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**COMPARATIVE ANALYSIS OF SYNTHESIS METHODS FOR  
DIRECT CURRENT MICRODRIVES RATE CONTROL**

The paper represents the results of the conducted research aimed at determining optimum-scale rate control systems settings in single- and double-circuit systems of direct current micro-drives automated control. To reach the aims of the research there has been used the laboratory software and hardware complex, its hardware component comprising NI ELVIS II workstation and circuitry board with direct current micro-drives; whereas its software being developed in NI LabVIEW graphic programming. The article describes structural patterns of automatic rate control system for laboratory test-bed. Different controllers synthesis methods have been determined and analysed. The rate controller coefficients have been calculated, the control system has been tested on laboratory, as well as transient processes in automatic rate control system have been shown in the form of diagrams. On the basis of the research results the has been prepared quality estimation of rate control according to the main measurements, and the conclusion is given showing practical application of synthesis methods possibilities. The total work has been completed in accordance with the Government order (service order 1047) for "Development of mobile intelligent platform on the basis of virtual reality technology, control elements and systems, adaptable for use in extreme environment conditions".

**Keywords:** automated rate control system, direct current micro-drives, laboratory software and hardware complex, controllers synthesis methods, transient processes, estimation of rate control quality.

В настоящее время наиболее интенсивно развивается отрасль робототехники, занимающаяся вопросами создания мобильных платформ для движения в различных экстремальных условиях внешней среды. Поэтому разработка систем регулирования скорости для приводов колес мобильных роботов является актуальной задачей.

Решение задачи синтеза системы регулирования начнем с того, что определим структуру, и параметры неизменяемой части системы управления. К неизменяемой части отнесём объект управления, включающий все технические средства, преобразующие управляющее воздействие в выходную координату (силовые преобразователи энергии, приводы, передаточные механизмы, рабочие органы и др.), а также датчики измеряемых координат устройства.

Рассмотрим структурную схему одноконтурной системы регулирования скорости, составленную на основе известного математического описания электромеханической системы с двигателем постоянного тока [2]. Структурная схема одноконтурной системы автоматического управления представлена на рис. 1.

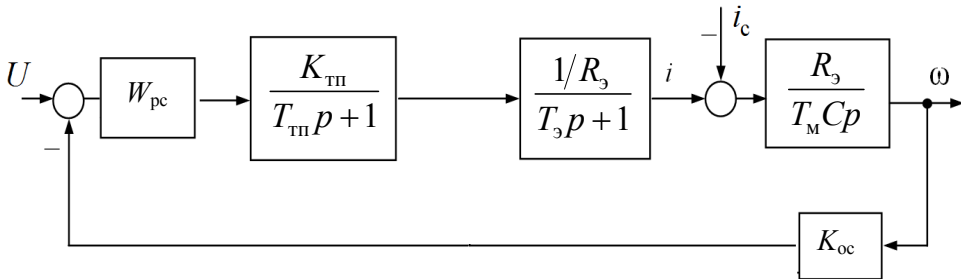


Рис. 1. Структурная схема одноконтурной системы регулирования скорости микропривода постоянного тока

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $W_{pc}$  – регулятор скорости, двигатель представлен апериодическим и интегрирующим звеньями, преобразовательное устройство представлено апериодическим звеном первого порядка,  $R_3$  – активное сопротивление якорной цепи,  $C$  – коэффициент электромеханического,  $K_{tp}$  – коэффициент усиления преобразователя,  $W_{pc}$  – передаточная функция регулятора скорости,  $U_{zc}$  – напряжение задания скорости,  $T_m$  – электромеханическая постоянная времени системы с учётом маховика,  $T_3$  – электромагнитная постоянная времени якорной цепи,  $K_{oc}$  – коэффициент обратной связи датчика скорости.

Так как  $T_3$  значительно меньше чем  $T_M$ , ею можно пренебречь, и система будет рассматриваться в качестве инерционного звена первого порядка с постоянной времени  $T_M$ . Изменённый вид структурной схемы представлен на рис. 2.

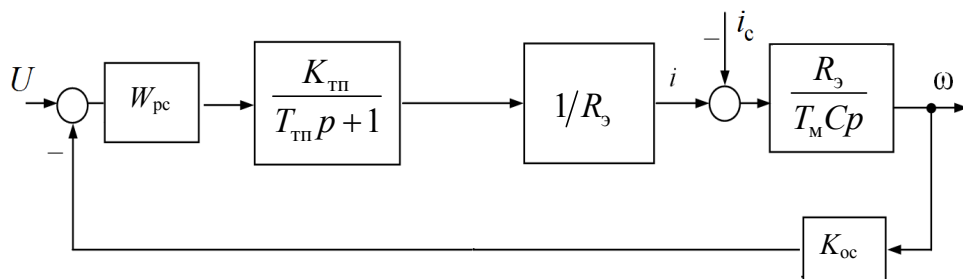


Рис. 2. Упрощённый вид структурной схемы одноконтурной системы регулирования

Прежде чем производить расчёт коэффициентов регуляторов, нужно определить критерии, по которым будет производиться оценка синтезируемой системы управления.

Качество системы автоматического регулирования (САР) будем оценивать по следующим основным показателям [1]:

– время переходного процесса – такое время, по истечении которого для управляемой величины выполняется условие:

$$|y - y_{уст}| \leq \delta_p,$$

где  $y$  – управляемая величина;  $\delta_p$  – некоторая величина (для САР 5 % от установившегося режима);

– перерегулирование – это процентное соотношение разницы максимального перерегулирования и установившегося значения:

$$\sigma\% = \frac{|y_{max} - y_{уст}|}{y_{уст}} \cdot 100\%;$$

– ошибка в установившемся режиме (точность САР)

$$e = |y - y_{уст}|.$$

Далее рассмотрим несколько различных методов синтеза регуляторов, выполним расчёт коэффициентов, проведем испытания системы управления на лабораторном стенде и выполним оценку качества регулирования скорости по основным показателям, рассмотренным ранее:

1) типовая методика синтеза контуров регулирования по желаемой передаточной функции разомкнутого контура.

За критерий качества регулирования контура будем принимать желаемую передаточную функцию разомкнутого контура.

Передаточная функция регулятора, настроенного на технический оптимум (ТО), имеет вид [1]:

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{1/W_{\text{ос}}}{2T_{\text{м}}p(T_{\text{м}}p+1)W_{\text{оу}}(p)};$$

2) настройка регулятора по методу Зиглера–Никольса (З-Н)

Для настройки регулятора данным методом необходимо вначале для замкнутой системы при разомкнутых И- и Д- составляющих регулятора определить граничное значение  $K_U$ , соответствующее  $K_P$ , при котором начинаются автоколебания, а также период этих автоколебаний –  $T_U$ . Затем по таблице, исходя из типа выбранного регулятора, рассчитываются соответствующие коэффициенты [3];

3) метод инженерной настройки (ИН).

Суть метода состоит в ручном подборе коэффициентов регулятора для получения оптимальных показателей качества переходного процесса. Исследования полученных систем регулирования скорости выполним на базе лабораторного стенда микроприводов постоянного тока.

Лабораторный комплекс представляет собой совокупность аппаратной и программной платформ. Аппаратная часть комплекса состоит из рабочей станции *NI ELVIS II* и специально разработанной платы для изучения работы микроприводов. Программное обеспечение разработано с использованием технологии виртуальных приборов в среде графического программирования *NI LabVIEW*.

Плата микроприводов состоит из исследуемого микродвигателя постоянного тока, соединительной муфты валов микромашин; микромашины постоянного тока, используемой в качестве механической нагрузки; маховика для увеличения инерционности микропривода, датчика скорости (энкодера).

Параметры приводного микродвигателя, установленного на стенде, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры микродвигателя постоянного тока

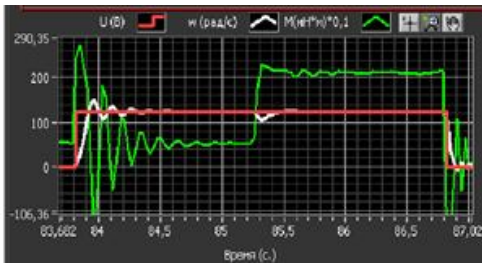
Марка двигателя	$P_{\text{н}}$ [Вт]	$I_{\text{н}}$ [А]	$M_{\text{н}}$ [Н·м]	$\omega_{\text{н}}$ [рад/с]	$L_{\text{я}}$ [Гн]
HS3SN-22240	3,84	0,11	0,01588	241	0,0065

В табл. 2 приведены коэффициенты полученных регуляторов, показатели качества реакции системы на ступенчатое изменение задания и показатели качества реакции системы на наброс нагрузки, полученные в результате опытов на лабораторном стенде.

Таблица 2

Сравнительный анализ показателей качества методов синтеза регулятора в одноконтурной системе регулирования

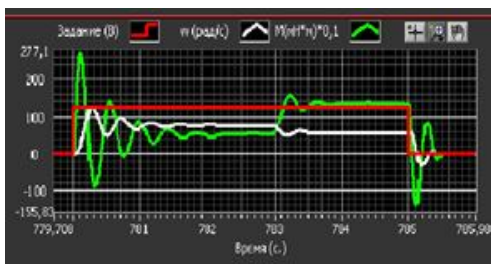
Метод	Коэф. регулятора			Показатели качества					
	K <sub>п</sub>	T <sub>и</sub>	T <sub>д</sub>	Изменение задания			Наброс нагрузки		
				σ [%]	t <sub>пн</sub> [с]	e[p/c]	σ [%]	t <sub>пн</sub> [с]	e[p/c]
Без рег.	1	–	–	17,7	0,56	81,5	0	0,27	90
ТО	2,3	0,5	–	10,3	0,31	0,9	11,2	0,33	1
З-Н	2,5	–	–	60,5	1,43	47,5	23	0,51	68,5
З-Н	2,25	0,35	–	26	1,3	3	34,4	1,17	3
З-Н	3	0,16	0,36	56,8	2,1	8	23,1	0,354	21
ИН			–	8,2	0,23	0,3	13,87	0,26	0,3



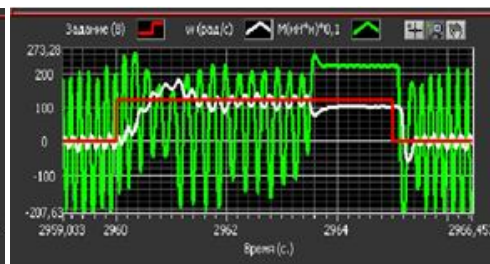
а



б



в



г

Рис. 3. Графики переходных процессов в одноконтурной САР скорости  
а – метод ИН (ПИ); б – метод З-Н (ПИ); в – метод З-Н (П); г – метод ТО (ПИ)

На рис. 3 на графиках переходных процессов зелёным цветом показана координата момента, белым – координата скорости.

Лучшее качество переходного процесса показал метод инженер-

ной настройки, график переходного процесса показан на рис. 3, а. Из недостатков этого метода нужно отметить высокую трудоёмкость и затраты по времени при подборе коэффициентов регулятора. Во время настройки методом ИН систему нужно довести до автоколебаний, что нежелательно для некоторых систем.

Немного худшие результаты показал регулятор, настроенный на ТО. Недостатком этого метода является необходимость построения математической модели объекта управления, что влечёт за собой некоторые трудности, а также существует вероятность допущения ошибки в расчётах. Из плюсов можно выделить приемлемое качество переходного процесса, возможность синтеза регулятора без снятия графика переходного процесса ОУ и отсутствие необходимости доводить систему до автоколебаний. Переходный процесс изображен на рис. 3, з.

Следующим по качеству результатов является метод З-Н, графики переходного процесса с ПИ и П регуляторами изображены на рис. 3, б и 3, в соответственно. Недостатком этого метода является необходимость доведения системы до автоколебаний. Из плюсов можно отметить простоту синтеза и удовлетворительное качество переходного процесса. Тем не менее этот метод является самым популярным.

Рассмотрим теперь наиболее распространённую двухконтурную систему регулирования скорости и тока якоря, составленную на основе известного математического описания электромеханической системы с двигателем постоянного тока [2]. Структурная схема двухконтурной системы изображена на рис. 4.

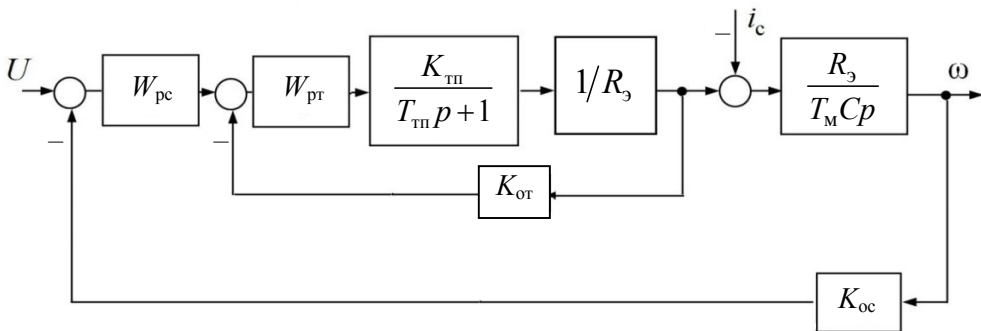


Рис. 4. Структурная схема двухконтурной системы регулирования скорости и тока якоря микропривода постоянного тока

На рис. 4 приняты следующие обозначения:  $R_a$  – активное сопротивление якорной цепи,  $C$  – коэффициент электромеханического,

$K_{от}$  – коэффициент обратной связи контура тока,  $K_{ос}$  – коэффициент обратной связи контура скорости,  $W_{рс}$  – передаточная функция регулятора скорости,  $W_{рт}$  – передаточная функция регулятора тока,  $U$  – напряжение задания скорости,  $T_m$  – электромеханическая постоянная времени системы с учётом маховика. Внутренний контур тока подчинён контуру скорости.

Далее рассмотрим несколько различных методов синтеза регуляторов, выполним расчёт коэффициентов, проведем испытания системы управления на лабораторном стенде и выполним оценку качества регулирования скорости по основным показателям, рассмотренным ранее.

1. Типовая методика синтеза контуров регулирования по желаемой передаточной функции разомкнутого контура:

а) апериодический оптимум первого порядка. За критерий качества регулирования контура будем принимать желаемую передаточную функцию разомкнутого контура. Передаточная функция регулятора, настроенного на апериодический оптимум (АО), имеет вид [1]:

$$W_{пер}(p) = \frac{1/W_{ос}}{T_m p W_{оу}(p)}.$$

Настроим на него контур регулирования тока;

б) технический оптимум. Передаточная функция регулятора, настроенного на технический оптимум (ТО), имеет вид [1]:

$$W_{пер}(p) = \frac{1/W_{ос}}{2T_m p (T_m p + 1) W_{оу}(p)};$$

в) симметричный оптимум. Передаточная функция регулятора, настроенного на технический оптимум (ТО), имеет вид [1]:

$$W_{пер}(p) = \frac{(4T_m p + 1)/W_{ос}}{8T_m^2 p^2 (T_m p + 1) W_{оу}(p)}.$$

Контур скорости настроим на симметричный и технический оптимумы.

2. Метод инженерной настройки (ИН).

В табл. 3 приведены коэффициенты полученных регуляторов, показатели качества реакции системы на ступенчатое изменение задания и показатели качества реакции системы на наброс нагрузки.

Таблица 3

Сравнительный анализ показателей качества двухконтурной системы

Метод	Коэф. регулятора			Показатели качества					
	$K_p$	$T_n$	$T_d$	Изменение задания			Наброс нагрузки		
				$\sigma$ [%]	$t_{пп}$ [с]	$e$ [р/с]	$\sigma$ [%]	$t_{пп}$ [с]	$e$ [р/с]
Без рег.	1	–	–	32	1,59	83	6	0,3	94
ТО	3	–	–	0	1,61	14	17	0,46	50
СО	4	0,4	–	11	0,51	0,5	20	0,48	1,2
ИН			–	9,5	0,24	0	10,5	0,2	0,9

При настройке контура тока на АО получились следующие коэффициенты:  $K_p$  – 0,6,  $T_n$  – 0,38. Графики переходных процессов в двухконтурной системе управления изображены на рис. 5.

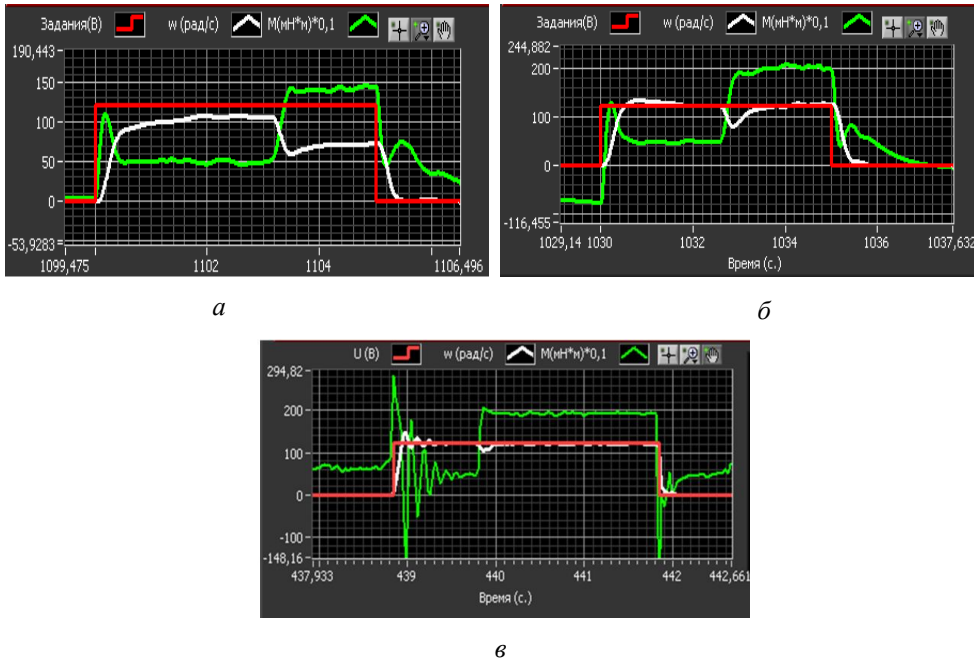


Рис. 5. Графики переходных процессов в двухконтурной САР скорости: а – метод ТО (ПИ); б – метод СО (ПИ); в – метод ИН (ПИ)

Лучшее качество переходного процесса показал метод инженерной настройки, график переходного процесса показан на рис. 5, в. Немного хуже себя проявил регулятор, настроенный на СО, график представлен на рис. 5, б. На последнем месте по показателям качества оказался регулятор, настроенный на ТО, показан график на рис. 5, а. Стоит отметить, что показатели качества двухконтурной системы по результатам опытов получились лучше, чем в одноконтурной системе.



В заключение следует отметить, что рассмотренный в статье лабораторный стенд по исследованию систем управления микроприводов постоянного тока и программное обеспечение к нему позволяют проводить значительно более широкий круг исследований, и в дальнейшем планируется разрабатывать, исследовать и тестировать более сложные методы и алгоритмы управления для использования их в приводах мобильных роботов.

### **Библиографический список**

1. Казанцев В.П. Теория автоматического управления. Линейные системы управления: учебное пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 165 с.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов. – Ленинград: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
3. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. – 1942. – Vol. 64. – С. 759–768.

### **Сведения об авторах**

**Даденков Дмитрий Александрович** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dadenkov@mail.ru).

**Шиляев Денис Викторович** (Пермь, Россия) – студент кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: denishilyaev@gmail.com).

### **About the authors**

**Dadenkov Dmitry Alexandrovich** (Perm, Russian Federation) is a Senior Lecturer at the Department of Automation Microprocessors, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky prospect, Perm, e-mail: dadenkov@mail.ru).

**Shilyaev Denis Viktorovich** (Perm, Russian Federation) is a student at the Department of Automation Microprocessors, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky prospect, Perm, e-mail: denishilyaev@gmail.com).

Получено 05.09.2013