

# ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ БЕЗДАТЧИКОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Панкратов В.В., Берестов В.М.

Опубликовано: Сборник трудов Всероссийской конференции по автоматизированному электроприводу – 2007

Аннотация. На основе общепринятых математических моделей непрерывного линейного приближения в работе рассматриваются особенности настройки контуров регулирования токов и частоты вращения транзисторного электропривода переменного тока с векторным управлением, приведены формулы для определения параметров регуляторов, определены диапазоны их возможных численных значений для ряда асинхронных двигателей общепромышленной серии.

Abstract. Peculiarities of adjusting current and speed control loops for field-oriented transistor ac drives have been considered in the paper on the basis of well-known continuous linear approximation models. Not only have the expressions for controller parameter determination been obtained but also the ranges of possible parameter values for a number of industrial family induction motors.

Введение. Опыт авторов в области разработки и наладки регулируемых асинхронных электроприводов, не использующих датчиков координат механического движения (т.н. бездатчиковых – от англ. "sensor-less"), показывает, что в абсолютном большинстве реальных систем векторного управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (АД), быстродействие которых ограничено дискретностью цифрового контроллера и широтно-импульсного преобразователя (ШИП) напряжений по времени, уровнем помех в оценках координат состояния, порожденных, в том числе, пульсациями напряжений и токов ШИП, а также требованиями к параметрической чувствительности алгоритмов управления, имеет место некоторая повторяющаяся закономерность, проявляющаяся в упорядоченности численных значений коэффициентов передачи регуляторов. В этой связи в настоящей работе, являющейся логическим продолжением [1 – 3], на основе общепринятых математических моделей непрерывного линейного приближения рассматриваются особенности настройки контуров регулирования токов и частоты вращения электропривода (ЭП) с векторным управлением, причем не только приведены формулы для определения параметров регуляторов, но и определены диапазоны их численных значений для ряда двигателей общепромышленной серии 4А.

Контур регулирования токов двигателя. Структурная схема контура регулирования одной из компонент вектора токов АД во вращающейся, ориентированной по направлению вектора магнитного потокосцепления ротора системе координат (при предположении о полной аддитивной компенсации основных составляющих ЭДС статора) приведена на рис. 1.

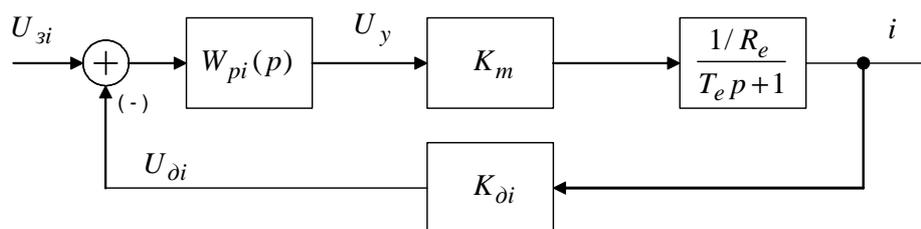


Рис. 1. Структурная схема контура регулирования тока

Здесь:  $W_{pi}(p) = K_i \left( 1 + \frac{\omega_1}{p} \right)$  – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора тока;  $K_m = \frac{E_d}{2U_{on}}$  – коэффициент передачи ШИП;  $E_d$  – напряжение звена постоянного тока преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения;  $U_{on}$  – амплитуда опорного сигнала модулятора;  $R_e$ ,  $T_e = L_{\sigma e} / R_e$  – эквивалентные активное сопротивление и постоянная времени рассеяния цепи статора;  $L_{\sigma e} = \sigma L_s$  – переходная индуктивность (эквивалентная индуктивность рассеяния) АД;  $K_{di}$  – коэффициент обратной связи по току, причем при точной компенсации регулятором электромагнитной инерции цепи статора ( $\omega_1 = \omega_e = 1/T_e$ )

$$W_{pi}(p) = \frac{U_{yn}}{U_{din}} \tau_i \omega_{ci} \left( 1 + \frac{\omega_e}{p} \right),$$

где  $\omega_{ci} = \frac{K_{di} K_i K_m}{L_{\sigma e}} = \frac{U_{din}}{U_{yn}} K_i \frac{1}{\tau_i}$  – частота среза логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) синтезируемого контура в разомкнутом состоянии;

$\tau_i = \frac{\sqrt{2} I_{1nf} L_{\sigma e}}{E_d / 2}$  – параметр, определяющий быстродействие системы регулирования токов "в большом" (при питании звена постоянного тока от бестрансформаторного мостового выпрямителя  $\tau_i = \frac{\sqrt{2} I_{1nf} L_{\sigma e}}{\sqrt{2} \sqrt{3} U_{1nf} / 2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{x_{\sigma e}}{\omega_0}$ , где для АД серии 4А  $x_{\sigma e} \approx 0,2$ );

$I_{1nf}$ ,  $U_{1nf}$  – номинальные ток и напряжение двигателя;  $\omega_0$  – номинальная циклическая частота напряжения статора;  $U_{yn}$ ,  $U_{din}$  – номинальные значения сигналов управления ШИП и обратной связи по току.

Из приведенных формул следует, что если номинальные значения сигналов задания ШИП и обратной связи по току одинаковы, что характерно для большинства приложений, то при единичном значении коэффициента передачи регулятора тока  $K_i$  имеем  $\omega_{ci} = 2\pi \cdot 216$  рад./с., т.е. полоса пропускания частот замкнутого контура регулирования тока составит 216 Гц. Если же, например, при частоте дискретизации ШИП 6 кГц (для двукратного семплирования или модуляции обоими фронтами частота опорного сигнала модулятора – 3 кГц) требуется получить удовлетворяющее условиям квазинепрерывности значение полосы пропускания частот цифрового контура тока 150 Гц, то коэффициент передачи регулятора должен составлять  $150/216=0,694$ . Обратным пересчетом можно определить значение  $\omega_{ci}$  для любого фиксированного  $K_i$ . Этот результат подтверждается многочисленными практическими разработками авторов.

Как правило, аддитивную компенсацию составляющих ЭДС статора, в частности доминирующей ЭДС вращения, можно не использовать, если увеличить частоту сопряжения ЛАЧХ регулятора тока до значений  $\omega_1 = \omega_{ci} / (2...3)$ . При этом скоростная ошибка регулирования моментобразующего тока (максимальная в электромеханических переходных процессах) будет вполне допустимой для большинства общепромышленных электроприводов.

Контур регулирования скорости. Используя аналогичный методический подход, рассмотрим и контур регулирования частоты вращения двигателя, структурная схема которого приведена на рис. 2 (инерционностью контуров регулирования токов в данном случае допустимо пренебречь).

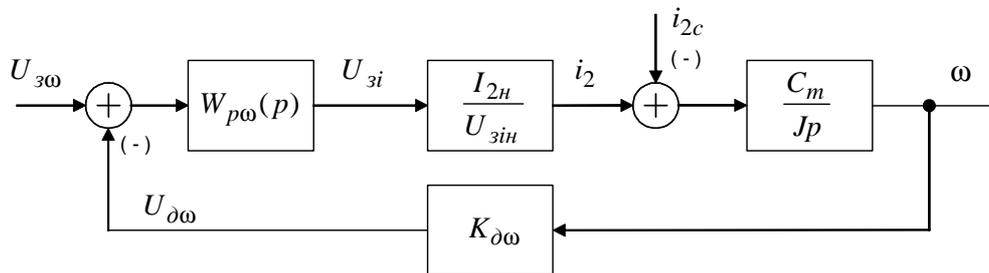


Рис. 2. Структурная схема контура регулирования частоты вращения

Здесь:  $W_{p\omega}(p) = K_{\omega} \left( 1 + \frac{\omega_1}{p} \right)$  – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора скорости;  $J$  – суммарный момент инерции ЭП;  $I_{2н}$ ,  $U_{зиn} = I_{2н} K_{\delta i}$  – номинальный моментобразующий ток электродвигателя  $i_2$  и сигнал его задания;  $C_m = M_n / I_{2н}$  – конструктивная постоянная АД;  $M_n$  – номинальный момент двигателя;  $\tau_{\omega} = \frac{\omega_n}{\epsilon_n} = \frac{J\omega_n}{M_n} = \frac{J\omega_n^2}{P_n}$  – параметр, характеризующий скорость протекания процессов по частоте вращения электропривода "в большом" – продолжительность разгона электропривода с нуля до номинальной скорости при номинальном динамическом моменте;  $\epsilon_n$ ,  $\omega_n$ ,  $P_n$  – номинальные угловое ускорение, скорость и мощность на валу АД;  $K_{\delta\omega} = U_{\delta\omega n} / \omega_n$  – коэффициент передачи обратной связи по частоте вращения.

Значения параметра  $\tau_{\omega}$ , который определяет соотношение между частотой среза ЛАЧХ контура

$$\omega_{c\omega} = \frac{K_{\delta\omega}}{K_{\delta i}} K_{\omega} \frac{C_m}{J} = \frac{U_{\delta\omega n}}{U_{зиn}} K_{\omega} \frac{1}{\tau_{\omega}},$$

и коэффициентом передачи регулятора, а также соответствующие значения  $\omega_{c\omega}$  при единичном коэффициенте  $K_{\omega}$ , пренебрежимо малом моменте инерции присоединенных маховых масс и  $U_{\delta\omega n} = U_{зиn}$  для некоторых двигателей серии 4А с числами пар полюсов  $p_n = 2, 3$  сведены в табл. 1.

Табл. 1

	$p_n = 3$					$p_n = 2$						
$P_n$ , кВт	2,2	5,5	15	55	75	2,2	5,5	15	55	75	132	315
$\tau_{\omega}$ , с	0,0648	0,08	0,13	0,26	0,42	0,062	0,076	0,164	0,29	0,328	0,467	0,55
$\omega_{c\omega}$ , рад/с.	$2\pi \cdot 2,4$	$2\pi \cdot 1,9$	$2\pi \cdot 1,2$	$2\pi \cdot 0,61$	$2\pi \cdot 0,38$	$2\pi \cdot 2,5$	$2\pi \cdot 2,1$	$2\pi \cdot 0,97$	$2\pi \cdot 0,55$	$2\pi \cdot 0,48$	$2\pi \cdot 0,34$	$2\pi \cdot 0,29$

При необходимости повышения быстродействия контура значение  $K_{\omega}$  следует пропорционально увеличивать, однако практика показывает, что в бездатчиковых ЭП в

силу указанных выше причин повысить коэффициент передачи регулятора более чем на порядок не удастся. Обычно он составляет 6...8. Отсюда несложно определить типичные значения частоты среза бездатчиковых ЭП различной мощности.

Для практической работы также можно рекомендовать выбор частоты сопряжения ЛАЧХ регулятора скорости по соотношению  $\omega_1 \approx \omega_{c\omega} / a_c$ , где коэффициент  $a_c \approx 2...3$ . В общем случае этот коэффициент характеризует показатели качества системы в переходных процессах по возмущению (моменту сопротивления нагрузки), см. рис. 3, и необходимую для обеспечения данных показателей перегрузочную способность ЭП  $\lambda_m$  по моменту (току  $i_2$ ), см. табл. 2 и рис. 4.

Здесь:  $\eta(t^*) =_{\Delta} \omega(t^*) \cdot \frac{\tau_{\omega} \omega_{c\omega}}{\omega_n \Delta m_c}$ ;  $t^* = t \cdot \omega_{c\omega}$ ;  $\Delta m_c =_{\Delta} M_c / M_n$  – относительное

приращение момента сопротивления нагрузки.

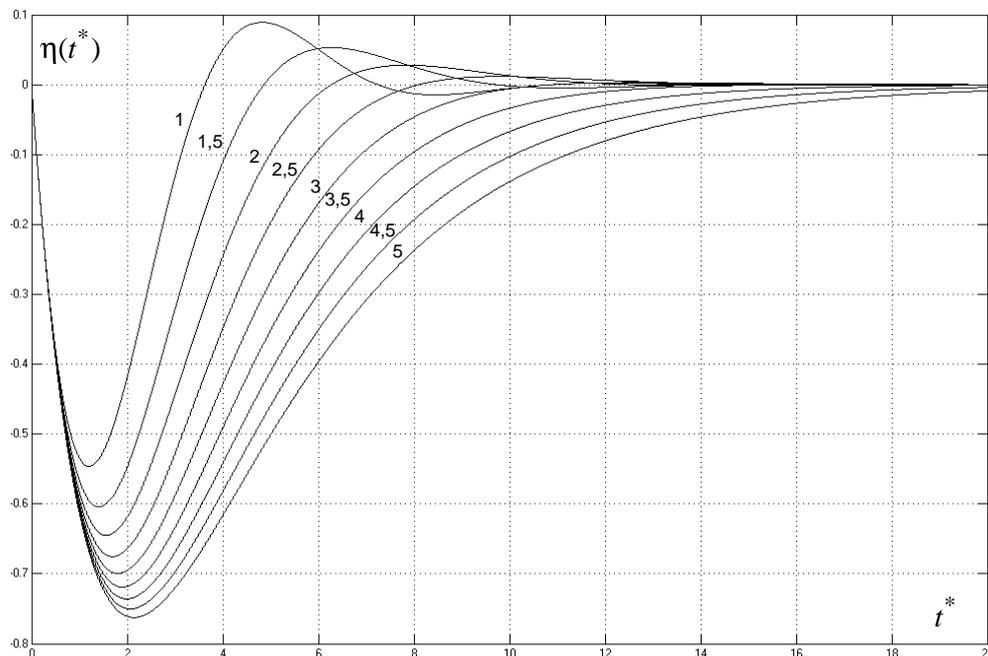


Рис. 3. Переходные характеристики контура скорости по возмущению для различных значений  $a_c$

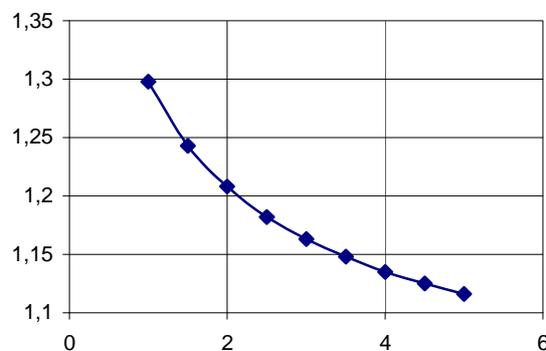


Рис. 4. Зависимость  $\lambda_m(a_c)$

Табл. 2

$a_c$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$\lambda_m$	1,298	1,243	1,208	1,182	1,163	1,148	1,135	1,125	1,116

**Заключение.** Рассмотренная в настоящей работе инженерная методика параметрического синтеза пропорционально-интегральных регуляторов токов и частоты вращения бездатчиковых транзисторных ЭП переменного тока раскрывает общие закономерности образования численных значений коэффициентов регуляторов и показателей качества соответствующих контуров. В частности, она оперирует частотой среза  $\omega_{c\omega}$ , которая при фиксированном коэффициенте  $a_c$  однозначно определяет основные показатели системы в переходных процессах по возмущению. Детально методика расчета параметров регулятора скорости по возмущающему воздействию, т.е. по требованиям к максимальному динамическому отклонению скорости ЭП при ступенчатом изменении момента сопротивления нагрузки на валу двигателя, коэффициенту неравномерности вращения (диапазону регулирования) в условиях изменяющихся нагрузок или интегральной ошибке регулирования (ошибке по положению ротора) изложена в статье [3].

1. Берестов В.М., Панкратов В.В. Расчет параметров системы регулирования частоты вращения асинхронного электропривода // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика / Вестник Национального технического университета "Харьковский Политехнический Институт". – НТУ "ХПИ", 2005. – С. 188 – 189.
2. Панкратов В.В., Берестов В.М. Методика параметрического синтеза систем регулирования бездатчиковых транзисторных электроприводов // Материалы VIII международной конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2006 (Новосибирск, 26 – 28 сентября 2006 г.), т. 7. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – С. 120 – 123.
3. Берестов В.М., Панкратов В.В. Параметрический синтез контура регулирования скорости транзисторного электропривода по возмущающему воздействию // Электричество. – 2006. – № 12. – С. 32 – 35.

**Панкратов Владимир Вячеславович** окончил Электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института в 1988 г. Докторскую диссертацию на тему "Методы синтеза систем автоматического управления электроприводами переменного тока, малочувствительных к изменениям параметров" защитил в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) в 1997 г. В настоящее время – профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок НГТУ, работает в области оптимального управления сложными электромеханическими системами в условиях неопределенности при ограниченных энергетических ресурсах. Подготовил 3 кандидатов наук. Автор более 100 научных трудов, 5 учебных пособий, 5 изобретений.

**Берестов Вячеслав Михайлович** – главный конструктор ЗАО "ЭРАСИБ" (г. Новосибирск), кандидат технических наук. В 1968 г. окончил факультет автоматики Новосибирского электротехнического института. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Исследование и разработка импульсных электроприводов постоянного тока с предельными динамическими характеристиками". Автор более 50 научных трудов и изобретений.