

УДК 621.313.333.2.078.3 (575.2) (04)

**РАЗРАБОТКА И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТАНКОВ И РОБОТОВ**

*И.В. Бочкарев* – докт. техн. наук,  
*И.Ш. Кадыров, М.Г. Гунина, Ж.Т. Галбаев* – канд. техн. наук, доценты,  
Кыргызский государственный технический университет

---

The developed scheme plan computer model of the item drive containing the asynchronous engine with the electromechanical brake device is described. Comparative results of modeling of a drive of the main movement of a screw-cutting lathe with various control systems are resulted.

Современное производство невозможно без использования автоматизированного станочного оборудования и промышленных роботов. Одним из основных направлений его развития является автоматизация, позволяющая выполнять производственные процессы без непосредственного участия человека. Применение автоматизированных позиционных электроприводов (АПЭ) даст возможность повысить не только степень автоматизации оборудования путем автоматизации управления, но и расширить его эксплуатационные возможности.

Несмотря на большое разнообразие станков и роботов, отличающихся друг от друга конструктивными и технологическими особенностями, их механизмы относятся к классу позиционных механизмов. Для разработки оптимальной структуры их АПЭ рассмотрим наиболее характерные конструкции металлообрабатывающих станков и промышленных роботов на примере токарно-винторезного станка модели 1К62 и робота модели М20П.40.

В данном станке привод главного движения осуществляется асинхронным электродвигателем, который через клиноременную передачу вращает ведущий вал. На нем установлен

электромеханический тормоз. При помощи многоступенчатой коробки скоростей, состоящей из последовательно включенных шестеренчатых передач, вращение передается на вал шпинделя. При обработке деталей с переменным радиусом для поддержания заданной скорости резания требуется регулирование частоты вращения шпинделя путем переключения шестерен коробки скоростей на ходу и под нагрузкой. Это обеспечивается путем управления главного привода станка от системы числового программного управления (ЧПУ). При этом ступенчатое регулирование скорости шпинделя осуществляется по заданной программе автоматическим переключением передач с помощью электромагнитных муфт, встроенных в коробку скоростей.

Промышленный робот (ПР) представляет собой стационарную или передвижную машину автоматического действия, состоящую из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, устройства программного управления для задания пространственного перемещения рабочего органа и сенсорных устройств, служащих для адаптации ПР с внешней средой [1]. Конструктивно ПР модели М20П.40, ис-

пользующийся для обслуживания металлорежущих станков с автоматическим циклом обработки детали, состоит из следующих основных механизмов: механизм поворота, механизм подъема и опускания, механизм выдвижения руки, балансир, механизм поворота кисти и механизм захвата. Указанные механизмы обеспечивают пространственное перемещение объекта манипулирования (механизма захвата). Привод механизма поворота осуществляется от электродвигателя через червячный редуктор и зубчатую пару. Механизм подъема содержит свой электродвигатель, который через винтовую передачу связан с механизмом выдвижения руки. Чтобы предотвратить падение механизма выдвижения руки при отключении двигателя, на верхнем конце винта установлен электромеханический тормоз. В продольном направлении механизм выдвижения руки приводится в движение с помощью электродвигателя через ременную и шарико-винтовую передачи. На корпусе руки закреплен поворотный блок, осуществляющий вращательное движение кисти руки относительно оси с помощью встроенного неполноповоротного пневмодвигателя. Механизм захвата приводится в движение с помощью пневмодвигателя.

Цикл работы любого позиционного механизма представляет собой перемещение рабочего органа из исходной позиции в заданную с последующей фиксацией в этом положении. Электроприводы таких механизмов работают в интенсивном повторно-кратковременном режиме с большой частотой включений, где динамические нагрузки определяют необходимую мощность, обеспечивающую максимальную производительность. При этом электроприводы работают в основном в переходных процессах, а установившиеся скорости практически отсутствуют [2].

На переходные процессы оказывают влияние упругие механические факторы, связывающие рабочий орган с приводом, наличие зазоров и кинематических погрешностей в передачах, которые вызывают колебания скорости под действием упругого момента, а также переменные моменты инерции и моменты нагрузки, определяемые технологическим процессом. При этом возникающие колебания скорости

можно эффективно погасить, используя демпфирующую способность электропривода, а погрешности регулирования, возникающие за счет влияния переменного момента инерции и момента нагрузки, компенсировать использованием адаптивного регулятора скорости.

Станки с ЧПУ и промышленные роботы относятся к позиционным машинным агрегатам, поэтому к обеспечению высокой точности отработки траектории при движении, позиционированию рабочего органа в заданной точке при останове, а также к плавности регулирования скорости в широком диапазоне предъявляются очень высокие требования. При этом сверхширокий диапазон регулирования скорости электропривода можно обеспечить только формированием абсолютно жестких механических характеристик, позволяющих получить высокостабильные рабочие скорости, не зависящие от изменений нагрузки, отклонений напряжения питающей сети, изменений температуры. Система управления электроприводом должна обладать инвариантными свойствами для мгновенного реагирования на изменение всех варьируемых параметров в контуре скорости и положения. Для обеспечения надежной работы при обслуживании технологического оборудования в системе управления электроприводом должен быть предусмотрен комплекс защит, исключающий любые аварийные ситуации за счет мгновенного срабатывания блокировок, запрещающих работу механизмов с последующим наложением тормозов к их вращающимся частям.

В настоящее время в электроприводах станков и роботов все шире находят применение асинхронные электродвигатели, которые являются наиболее простым, дешевым и надежным типом двигателей переменного тока. Питание таких электродвигателей потребовало создания трехфазных преобразователей частоты (ПЧ). Отсутствие в прошлом высокоточных ключей с большим обратным напряжением тормозило широкое промышленное внедрение ПЧ. Сегодня наличие на рынке "интеллектуальных" IGBT модулей на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором, а также высокоскоростных микропроцессорных устройств привело к резкому

удешевлению и возможности массового внедрения электроприводов с ПЧ.

Проведенный комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ позволил разработать систему “транзисторный преобразователь частоты – асинхронный двигатель” (ТПЧ – АД) с улучшенными техническими показателями (рис. 1) [3]. В основу построения системы частотно-токового управления асинхронного привода положен закон поддержания постоянства потокосцепления ротора  $\Psi_2$ . В этой системе осуществляется двухконтурное подчиненное регулирование приводного двигателя с внутренним контуром момента и внешним контуром скорости. Асинхронный двигатель АД питается от преобразователя частоты ПЧ, обладающего свойством источника тока ИТ. Для формирования вектора тока статора  $I_1$  в схеме управления преобразователем частоты предусмотрено три канала задания управляющих переменных:  $u_{3ч}$  – напряжение для задания частоты,  $u_{3м}$  – напряжение задания амплитуды и  $u_{3ф}$  – напряжение задания фазы тока статора. Нелинейные элементы НЭ1 и НЭ2 обеспечивают необходимый закон управления с целью поддержания постоянства потокосцепления ротора  $\Psi_2 = \Psi_{2ном} = const$ . Входным сигналом нелинейных блоков является напряжение задания момента двигателя  $U_{эм}$ , пропорционального абсолютному скольжению  $S_a$ , а выходными соответственно  $U_{3м}$  и  $U_{3ф}$ .

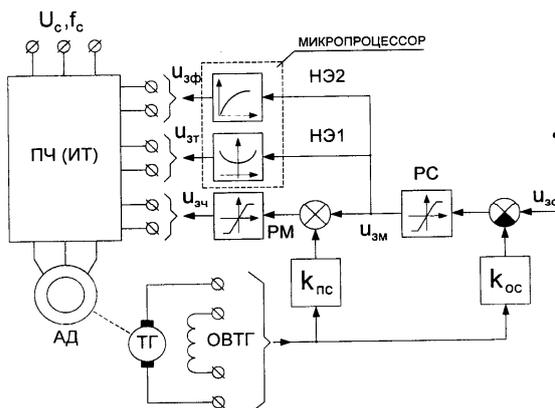


Рис. 1. Функциональная схема электропривода по системе ТПЧ – АД.

Данная система охвачена двумя контурами обратной связи тока (и пропорционального ему момента) и скорости. Для поддержания  $\Psi_2 = const$  необходимо изменять как амплитуду  $I_{1max}$ , так и фазу  $\varphi_1$  тока статора  $I_1$ . Поэтому характеристики нелинейных элементов НЭ1 и НЭ2 обеспечены такими, чтобы их выходные сигналы соответствовали следующим выражениям:

$$u_{3м} = \frac{\Psi_{2max}}{k_{ym} L_{12}} \sqrt{1 + L_2^2 k_f^2 k_{pm}^2 u_{3ч}^2 / R_2'} ;$$

$$u_{3ф} = \frac{1}{k_{yф}} \arctg \frac{L_2 k_f k_{pm} u_{3ч}}{R_2} , \quad (1)$$

где  $k_f = \omega_{0.эл} / u_{3ч}$ ;  $k_{yф} = \varphi_1 / u_{3ф}$ ;  $k_{ym} = I_{1max} / u_{pm}$  – коэффициенты приведения к сигналам управления;  $\omega_{0.эл} = k_f u_{3ч}$  – приведенная синхронная угловая скорость магнитного поля;  $L_2$  и  $R_2'$  – индуктивность и активное сопротивление обмотки ротора;  $L_{12}$  – взаимная индуктивность статора и ротора.

Представив регулятор момента пропорциональным звеном с коэффициентом усиления  $k_{pm}$ , уравнение динамической механической характеристики электропривода в области регулирования момента при критической положительной связи по скорости получаем в следующем виде:

$$M = k_m u_{3м} - T_э dM / dt , \quad (2)$$

где  $k_m = \beta k_f k_{pm} / p$  – коэффициент передачи момента;  $p$  – число пар полюсов АД.

Разработанная система управления достаточно полно реализует изложенные выше требования, предъявляемые к электроприводам.

Для улучшения динамических свойств электроприводов автоматизированных станков и промышленных роботов целесообразно использование асинхронных двигателей со встроенным нормально замкнутым электромеханическим тормозным устройством (ЭМТУ) [4, 5]. Это обеспечит повышение точности позиционирования рабочих органов, уменьшение времени на вспомогательные операции, связанные с перемещением инструмента и заготовки с их последующей остановкой и фиксацией в точке позиционирования, а также повышение надежности оборудования и безопасности работы обслуживающего персонала.



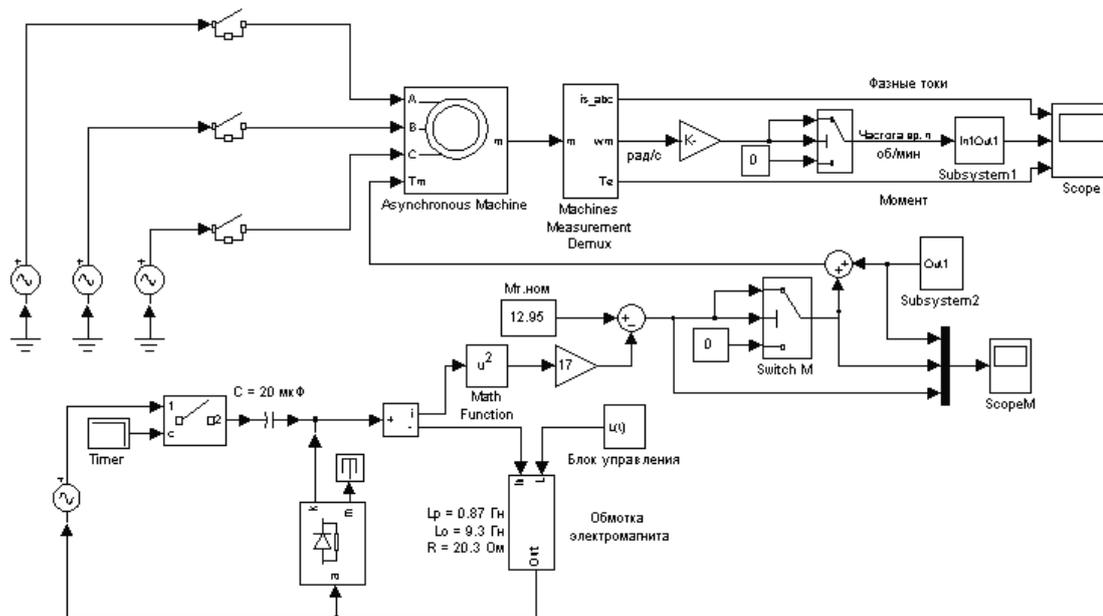


Рис. 3. Структурная схема АД с ЭМТУ.

порту  $m$  формируется выходной векторный сигнал, состоящий из 21 элемента. Для удобства извлечения векторных переменных машины предусмотрен блок Machines Measurement Demux. Порт  $T_m$  предназначен для подачи момента сопротивления движению. В зависимости от режима работы двигателя на этот порт подаются определенные значения.

В модели АД со встроенным ЭМТУ (рис. 3) на порт  $T_m$  подается фактический закон изменения тормозного момента на валу электродвигателя  $M_m(t)$ , полученный в блоке, представляющем собой механическую часть ЭМТУ.

Закон изменения тормозного момента на валу электродвигателя, создаваемого тормозом в переходных режимах работы, описывается следующим выражением:

$$M_m(t) = M_{m.ном} - K \cdot i(t)^2, \quad (3)$$

где  $M_{m.ном}$  – номинальный тормозной момент при отключенной обмотке электромагнита;  $K$  – конструктивный фактор, значение которого является для каждого ЭМТУ величиной постоянной, не зависящей от режима работы;  $i(t)$  – ток в обмотке электромагнита.

Величину номинального тормозного момента можно вычислить по формуле [4]:

$$M_{m.н} = z \cdot k_{mp} \cdot k_z \cdot R_{cp} \cdot F_{np}, \quad (4)$$

где  $Z$  – число пар поверхностей трения;  $k_{mp}$  – коэффициент трения;  $F_{np}$  – осевое усилие тормозных пружин;  $R_{cp}$  – средний радиус действия силы трения;  $k_z$  – коэффициент уменьшения осевого усилия  $F_{np}$  вследствие потерь на трение в направляющих штифтах.

Выражение для расчета конструктивного фактора можно получить на основе формулы Максвелла для тягового усилия, развиваемого электромагнитом

$$K = z \cdot k_{mp} \cdot k_z \cdot R_{cp} \frac{\mu_0 \cdot S_n \cdot W^2}{4\delta_p^2}, \quad (5)$$

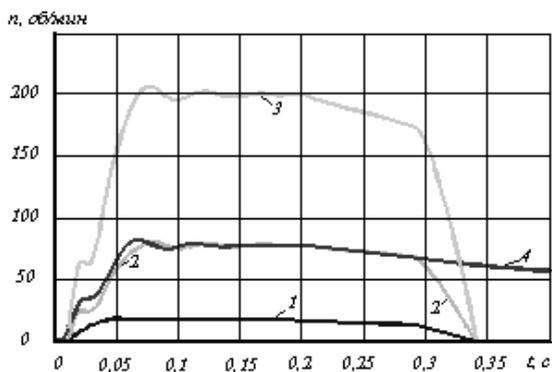
где  $S_n$  и  $W$  – площадь полюса и число витков обмотки растормаживающего электромагнита;  $\delta_p$  – рабочий воздушный зазор.

Модель механической части ЭМТУ построена на базе выражения (1).

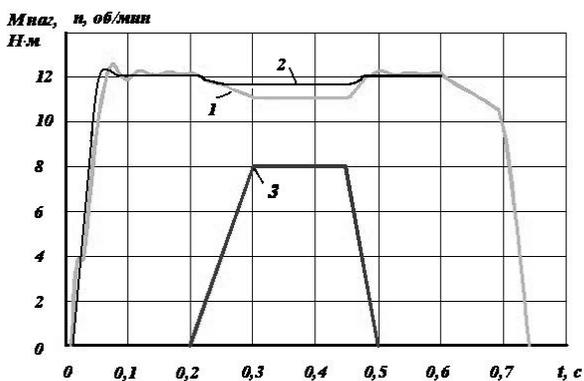
Блок Subsystem 2 имитирует механическую нагрузку на вал асинхронного двигателя в процессе работы. Электрическая часть модели ЭМТУ содержит источник сигнала, схему управления и собственно обмотку электромагнита, которая состоит из активного сопротивления и блока регулируемой индуктивности.

Изменение индуктивности возникает за счет изменения воздушного зазора между якорем и магнитопроводом растормаживающего электромагнита. В модели, приведенной на рис. 3, использована однополупериодная схема управления с предвключенным конденсатором. Однако разработанная модель позволяет анализировать работу АД при использовании различных схем управления ЭМТУ [4, 6].

Блок Subsystem 1 может содержать модель привода передачи движения от вала двигателя к рабочему органу станка или промышленного робота, что позволяет непосредственно рассматривать процессы, протекающие в электроприводе.



а



б

Рис. 4. Кривые частоты вращения шпинделя токарно-винторезного станка 16К20 а – при различных положениях регулятора коробки скоростей; б – под нагрузкой.

В качестве примера приведем результаты моделирования привода главного движения токарно-винторезного станка 16К20, содержащего асинхронный двигатель с электромеханическим тормозным устройством, который питается от транзисторного преобразователя IGBT, содержащего модуль IRG40KD1200. На рис. 4 показаны зависимости частоты вращения шпинделя токарно-винторезного станка от времени.

На рис. 4а приведены кривые частоты вращения шпинделя станка при различных положениях регулятора коробки скоростей (кривые 1–3) и кривая 4, представляющая собой частоту вращения шпинделя станка в случае, если в его электроприводе отсутствует электромеханическое тормозное устройство. Анализируя полученные кривые можно сделать вывод, что применение ЭМТУ в электроприводе станков на порядок уменьшает время холостого выбега рабочего органа при остановке электродвигателя, что повышает производительность станка.

На рис. 4б приведены зависимости частоты вращения шпинделя токарно-винторезного станка от времени под нагрузкой без использования регулятора частоты (кривая 1) и с использованием ТПЧ по схеме, изображенной на рис. 2 (кривая 2), а также соответствующая нагрузочная диаграмма (кривая 3). Если необходимо задать другую нагрузочную диаграмму, достаточно внести необходимые изменения в соответствующие элементы блока Subsystem 2 (рис. 3).

Из рис. 4б видно, что применение разработанной системы управления электропривода “ТПЧ – АД с ЭМТУ” обеспечивает высокую степень стабилизации частоты вращения электродвигателя, а также снижает перерегулирование скорости как при пуске, так и при изменениях нагрузки.

#### Литература

1. Сафонов Ю.Н. Электроприводы промышленных роботов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация промышленных механизмов. – М.: Энергия, 1980.

3. *Кадыров И.Ш.* Проектирование электромеханических систем для машин автоматического действия. – Бишкек: ИЦ “Техник”, 2006.
4. *Бочкарев И.В.* Быстродействующие электромеханические тормозные устройства для электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 2001.
5. *Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т.* Электродвигатели с встроенным электромеханическим тормозом для станков и роботов. – Бишкек: Илим, 2005.
6. *Бочкарев И.В., Гунина М.Г., Свечкаренко Д.В.* Разработка схем управления и расчет переходных и квазиустановившихся режимов работы быстродействующих электромеханических тормозных устройств для станочных электроприводов. – М.: Электротехника, 2003. – №7. – С. 17–25.