

## РАЗРАБОТКА ВЫСОКОДИНАМИЧНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ

**Е. Н. ВЕРЕЦАГО**, канд. техн. наук, **В. Ф. КВАСНИЦКИЙ**, **Г. Ф. РОМАНОВСКИЙ**, доктора техн. наук  
(Нац. ун-т кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев),  
**О. Ф. ПРОСЯНОВ**, инж. (НПП «Укртермаш», г. Николаев)

Рассмотрен новый подход к построению систем управления электроприводами создаваемых машин для тепловой резки из условия реализации предписанных траекторий движения, направленный на расширение сферы их применения и повышение экономической эффективности использования.

*Ключевые слова:* термическая резка, компьютерное управление, электропривод подачи, автоматическое слежение, позиционирование, установка для резки

Современное заготовительное производство отличается широким применением машин, оборудования и технологий термической резки [1, 2], позволяющих эффективно решать проблему автоматизации и механизации производственного процесса одновременно с повышением производительности и обеспечением требуемых точности и качества вырезаемых заготовок (регламентируются ГОСТ 14792–80 и аналогичными стандартами Германии, Франции и других стран). Новые установки и оборудование для термической резки зарубежного производства сложные и дорогостоящие. Поэтому возникла необходимость в создании менее дорогих, но качественно работающих универсальных отечественных машин для термической резки (МТР).

Цель настоящей работы — создание высокодинамичной машины для плазменной и лазерной резки. Одна из таких машин разработана Национальным университетом кораблестроения имени адмирала Макарова совместно с НПП «Укртермаш». Машины «Кристалл-ТМ» освоены в промышленном производстве, их поставляют на ряд предприятий, где они успешно работают.

Указанные машины, относящиеся к сварочным промышленным роботам класса IF 191 [3], включают следующие элементы: резательные установки, управляющие системы и двигательные или моторные системы, состоящие из исполнительных приводов и механизмов. Для получения высокой точности вырезки деталей их необходимо рассматривать как единый взаимосвязанный комплекс.

Наиболее рациональными, с точки зрения точности, качества, эффективности и производительности разделения различных материалов, в настоящее время являются технологии плазменной (в том числе HiFocus, HiDefinition, HiSpeed, LongLife и другие технологии) и лазерной резки [3]. Точность плазменной резки достигает 0,25 мм при повторяемости  $\pm 0,175$  мм, а лазерной — соответственно 0,10 и  $\pm 0,05$  мм [3]. Однако для плазменной и лазерной резки требуются большие скорости [3, 4]. Скорость резки на типовых машинах

приближается к 12 м/мин, а ускоренного движения — 20 м/мин. Очевидно, что эти требования могут быть реализованы только на современных высокодинамичных и высокоскоростных машинах.

Опыт эксплуатации отечественных машин выпуска прошлых лет показал, что их транспортно-механическое оборудование рационально и долговечно [1, 2]. Поэтому при проектировании механической части новой машины за основу принята типовая наиболее рациональная и хорошо зарекомендовавшая себя конструкция портального типа с прямоугольной компоновкой [1, 2]. Машина для резки материалов с двухсторонним прецизионным реечным приводом приведена на рис. 1. Она представляет собой механическую систему, состоящую из достаточно жестких узлов, соединенных упругодиссипативными связями.

Зазоры в реечной подаче выбираются автоматически с помощью силового прижатия шестерни к рейке, а в зубчатых передачах редукторов — путем регулировки межосевых расстояний. Направляющие ходовой каретки включают саморегулируемые боковые ролики, удерживающие раму от сползания. При этом точность механической части повышается на порядок.

Успешное решение задачи создания машин с современной режущей оснасткой, сокращение временных и материальных затрат на проектирование технологии и пусконаладочные работы, упрощение эксплуатации и ремонта МТР достигнуты благодаря переходу к блочно-модульному построению машин — конструированию с учетом международных стандартизации и унификации из типовых

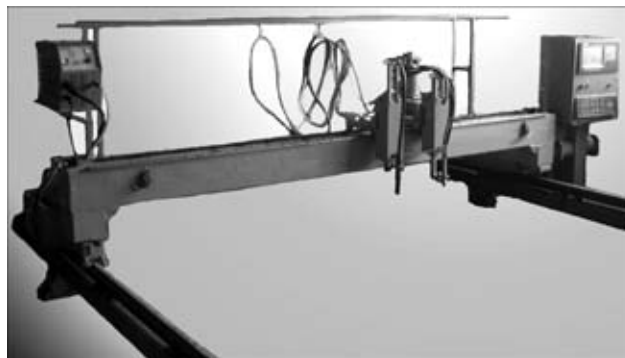


Рис. 1. Базовая модель машины «Кристалл-ТМ»

узлов и модулей как их механической части, так и информационно-управляющей и двигательной систем. Все это позволило реализовать идею легко переналаживаемых универсальных МТР, что создало предпосылки для роботизации мелкосерийного и серийного производства в условиях малых и средних предприятий.

Важными характеристиками резательных машин являются точность позиционирования и повторения движения. В соответствии с определениями, введенными японскими специалистами [5], следящие системы МТР относятся к ползуамкнутым системам, в которых производится косвенное измерение положения упругого механизма. Точность позиционирования машины в этом случае почти полностью определяется ошибкой механической системы. При этом высокие точность повторения и позиционирования можно обеспечить соответствующей коррекцией в устройстве ЧПУ (измеряя зазоры и погрешности передачи). Например, зазор в ползуамкнутой по положению структуре компенсируется в соответствии с выражениями:

$$N_{зф} = N_{зф}^0 + N_b \text{ при } N_{\omega} > 0;$$

$$N_{зф} = N_{зф}^0 - N_b \text{ при } N_{\omega} < 0,$$

где  $N_{зф}^0$  — код заданного перемещения без учета зазора;  $N_b$  — код, являющийся цифровым эквивалентом предварительно измеренного зазора.

Анализ показал, что для достижения требуемой точности и чистоты поверхности изделия, обрабатываемого на МТР, основной задачей является обеспечение равномерного движения механизмов подачи при высоком быстродействии систем регулирования, т. е. требований, предъявляемых к автоматизированному электроприводу. Для решения данной задачи необходим новый подход к построению следящих систем управления по траектории.

Применительно к рассматриваемому случаю производительность машин и качество выпускаемой ими продукции во многом зависят от показателей качества динамики электропривода. Существенными факторами, определяющими динамические свойства электроприводов, являются неустойчивость их параметров и внешних воздействий, наличие нелинейностей и упругих звеньев, что не позволяет достаточно полно использовать потенциальные возможности транзисторных преобразователей. На точность воспроизведения контура заготовки влияют форма контура детали и скорость движения по контуру. Так, движение МТР при обходе углов сопровождается динамическими эффектами. Механические системы привод-портал и привод-суппорт подвергают импульсному воздействию. Длительность импульса определяется выражением

$$T_{и} = \pi R / (2v),$$

где  $R$  и  $v$  — соответственно радиус и скорость обхода.

Для порталных роботов плазменной и лазерной резки радиус окружности, аппроксимирующей прямой угол, равен соответственно  $1...4$  и  $0,1...1,0$  мм. Поскольку время прохождения угла соизмеримо с периодами собственных колебаний портала и суппорта (частоты собственных колебаний составляли соответственно 8,58 и 21,32 Гц), то следует ожидать, что из-за динамических эффектов форма исходного угла будет искажена.

Рассмотрим данный подход применительно к системам управления положением упругого динамического объекта с подчиненным регулированием трех переменных — положения, скорости и тока. В настоящее время более распространенные системы построены по принципу подчиненного регулирования [3]. Позиционные механизмы МТР, как правило, имеют привод с двигателями постоянного тока с независимым возбуждением. Поэтому ограничимся рассмотрением только этого привода.

Обычно наличие упругости приводит к появлению различного рода механических колебаний. В этом случае демпфирование (компенсация) упругих колебаний за счет автоматизированного электропривода сводится к необходимости одновременного снижения динамических коэффициентов усиления регуляторов скорости и тока в такой степени, чтобы резонансные всплески амплитудной частотной характеристики не заходили в запретную зону. При перенастройке регуляторов реализуемая полоса пропускания контура положения принципиально остается значительно ниже частот механического резонанса, т. е. существенно снижается добротность следящей системы и недоиспользуются динамические свойства современного транзисторного электропривода.

Высокое качество регулирования, подавление упругих колебаний и нормальное функционирование в условиях изменения параметров привода и коэффициентов настроек контуров подчиненного регулирования в широком диапазоне достигаются коррекцией контура положения исполнительного вала за счет введения в регулятор положения активного режекторного фильтра с независимым управлением положением нулей и полюсов его передаточной функции

$$W(p) = \frac{b_0(p^2 + \omega_0^2)}{\omega_0^2(p^2 + b_1p + b_0)}$$

(здесь  $p$  — оператор преобразования по Лапласу;  $b_0, b_1$  — коэффициенты настройки;  $\omega_0$  — частота режекции фильтра, которую выбирают равной частоте упругих колебаний) и нового контура управления ускорением, являющегося средством устранения неопределенностей в поведении объекта (рис. 2). Очевидно, что для компенсации упругих колебаний в передаточную функцию фильтра необходимо ввести нуль, равный значению собственной частоты колебаний двухмассовой системы.

Процедура синтеза дополнительного контура воздействия проводится в два этапа: сначала определяется ускорение, при котором реализуется

назначенная траектория, затем вычисляется корректирующее воздействие.

Для реализации намеченного выше решения необходимо, чтобы динамика системы по выходной переменной  $\varphi$  соответствовала уравнению

$$\ddot{\varphi}^* + a_1\dot{\varphi}^* + a_0\varphi^* = a_0\varphi_3 \quad (a_0, a_1 > 0),$$

где  $e = \ddot{\varphi}^* - \ddot{\varphi}$  — программное значение второй производной регулируемой величины, являющееся задающим воздействием;  $\ddot{\varphi}^*$  определяет отклонение фактического поведения от желаемого  $e(t) = 0$ ;  $a_0, a_1$  — постоянные параметры, выбор которых определяет вид траектории  $\varphi^*(t)$ ;  $\varphi_3$  — предписанное значение выходной переменной (угла поворота вала двигателя).

Для компенсации этого рассогласования организуется с помощью регулирования по отклонению обратная связь

$$\mu(t) = ke(t),$$

где  $k$  — коэффициент усиления, определяемый из условий обеспечения заданной ошибки в статике и динамике. Программное значение  $\ddot{\varphi}^*$  сформировано согласно уравнению

$$\ddot{\varphi}^* = a_0(\varphi_3 - \varphi) - a_1\dot{\varphi}.$$

Для реализации управления необходимо многократное дифференцирование наблюдаемого сигнала  $\varphi$ . Получение точных значений производных затруднено из-за случайных возмущений, шумов в наблюдениях, аппаратных шумов. Имея в виду, что момент двигателя пропорционален току в якорной цепи, значение второй производной от угла поворота при известных параметрах двигателя может быть вычислено с точностью до значений момента сопротивления, полученного при измерении тока якоря  $i_{я}$ . Это означает, что величина  $d^2\varphi/dt^2$  может быть оценена с помощью пропорционального звена, если на его вход подается непосредственно измеренный ток якоря  $i_{я}$ . Теперь определяем сигнал воздействия

$$\mu(t) = k[a_0(\varphi_3 - \varphi) - a_1\dot{\varphi} - a_2i_{я}]$$

и замыкаем выход дополнительного контура на вход пропорционально-интегрального регулятора тока (см. рис. 2). Использование дополнительной обратной связи позволяет построить замкнутую систему с движениями, независимыми в асимптотике от изменения в широких пределах параметров объекта и неконтролируемых внешних возмущений. Как правило, при проектировании системы оказывается возможным назначить желаемое время регулирования  $t_p^*$  при обработке постоянных воздействий, а также указать характеристики переходного процесса — перерегулиро-

вание  $\sigma$ , показатель колебательности  $\xi$  и др. По этим данным можно определить коэффициенты передачи решающего усилителя  $a_0, a_1$ . Как отмечалось выше, в контуре положения необходимо обеспечить сочетание противоречивых требований — широкую полосу пропускания (высокую точность слежения при воспроизведении программы) в контурном режиме и апериодическую характеристику в режиме позиционирования рабочего органа. Исходя из требуемых динамических свойств, представим в стандартном виде эталонную модель, порядок дифференциального уравнения которой не выше второго:

$$\tau^2\ddot{\varphi}^* + 2\xi\tau\dot{\varphi}^* + \varphi_3^* = \varphi_3,$$

где  $\tau$  — постоянная времени;  $\xi$  — коэффициент затухания колебаний. Сравнивая последнее уравнение с назначенным, имеем

$$a_1 = 2\xi\tau^{-1}, \quad a_0 = \tau^{-2}.$$

Как известно, если  $\xi = \sqrt{2}/2$  (настройка на оптимум по модулю), то длительность переходного процесса составляет  $t_p^* \approx 3\tau$ , а перерегулирование — 4,3 %. Такие характеристики для приводов подач наиболее предпочтительны. Принимая  $\xi = \sqrt{2}/2$ , получаем

$$a_1 = \sqrt{2}\tau^{-1}; \quad a_0 = \tau^{-2}; \quad \tau = t_p^*/3.$$

Затем вычисляется требуемое значение  $k$ , при котором реализуется предписанная траектория движения.

Экспериментальные исследования (рис. 3) электропривода подач с контурами тока, скорости и положения, имеющими стандартные настройки, при трех- и пятикратном изменении параметров объекта (инерционных масс упругого объекта, параметров привода), действии статический и ударной нагрузки, а также при больших расстройках контуров подчиненного регулирования, приводя-

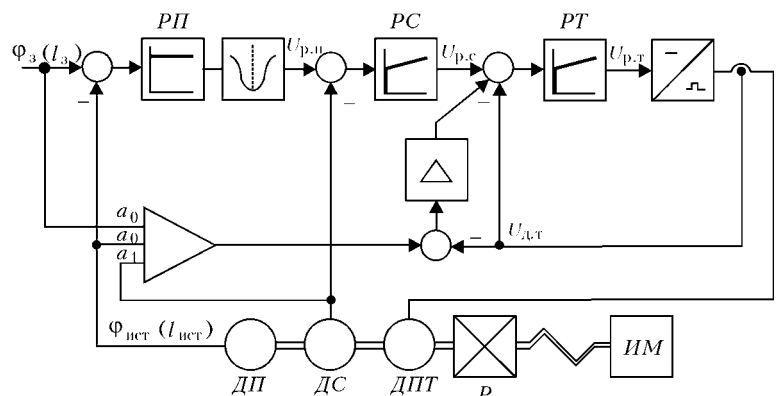


Рис. 2. Функциональная схема следящего электропривода подач МТР с ЧПУ: РП, РС, РТ — регуляторы соответственно положения, скорости и тока; ДП, ДС — датчики соответственно положения и скорости; ДПТ — двигатель постоянного тока; Р — редуктор; ИМ — исполнительный механизм;  $\varphi_3(l_3)$ ,  $\varphi_{ист}(l_{ист})$  — соответственно заданное и истинное значения угла поворота (положения) исполнительного двигателя;  $l_3, l_{ист}$  — линейное перемещение исполнительного механизма соответственно заданное и истинное;  $U_{р.л}, U_{р.с}, U_{р.т}, U_{д.т}$  — соответственно выходное напряжение регуляторов положения, скорости, тока и датчика тока

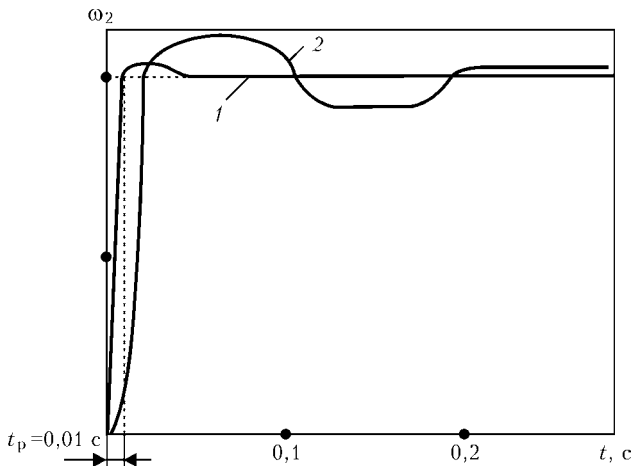


Рис. 3. Переходные процессы в следящей системе подачи МТР: 1 — при включенной коррекции с добротностью 50 рад/с; 2 — без коррекции с добротностью 8 рад/с;  $\omega_2$  — угловая скорость исполнительного механизма

щих типовую систему в нерабочее состояние, показали, что введение режекторного фильтра и контура управления ускорением обеспечивают эффективное подавление резонансных явлений в приводах подач (при отсутствии последних наблюдаются колебания второй массы с частотой 8...10 Гц), более высокую равномерность вращения (коэффициент неравномерности уменьшается примерно в 1,5...3,0 раза), высокое качество регулирования (апериодический переходный процесс имеет заданную форму с временем процессов 0,01 с и перерегулированием 5 %, что соответствует полосе пропускания контура положения не менее 50 Гц). При этом полоса пропускания следящей системы подачи роботов с ЧПУ при воспроизведении программы в режиме контурной обработки расширяется более чем в 5 раз (с 10...15 до 50 Гц и более), т. е. перекрывает область его резонансных частот. Заметим, что в исходной системе регулирование заканчивается за 0,15...0,20 с ( $t_p \approx 3(\omega_c)^{-1}$ , где  $\omega_c$  — частота среза).

Применение новых приводов в МТР способствовало подавлению вибраций, в том числе и при одновременной работе обоих приводов с изменяющейся скоростью, что обеспечивало весьма точно воспроизведение линейных и круговых участков, острых углов (наиболее сложный элемент для слежения), высокую динамическую реакцию (максимальное отклонение от заданной траектории составляло всего 0,02 мм), максимальную скорость двигателя, развиваемой системой (около 20 м/мин).



Рис. 4. Машина «Кристалл ППЦ-2,5» после модернизации

В то же время не требуется выполнение трудоемкой наладки как на стадии ввода МТР, так и при их модернизации или ремонта.

Важной частью машины является ее система управления. В МТР используется устройство типа CNC (Compute Numerical Control) — современный аналог числового программного управления. Программы записываются в стандартных кодах ESSI или ISO (ГОСТ 20.999–83) и представляют собой последовательность строк, где для каждого отрезка задаются координаты точки, в которую необходимо переместиться, а также способ и параметры интерполяции при выполнении данного перемещения [6].

С привлечением подходов, изложенных в настоящей работе, создано семейство новых высокодинамичных машин для резки. Оно включает 11 модификаций, приспособленных к компоновочным особенностям обслуживаемого оборудования, а также к характеру (серийности) производства. Базовая машина представляет собой дальнейшее развитие МТР типа «Кристалл».

Созданные машины предусматривают обработку листов шириной до 3,6 м, толщиной до 300 мм в зависимости от оснастки для резки. Их можно эффективно использовать на средних и крупных предприятиях. Для предприятий, уже имеющих МТР с цифровыми или фотокопирующими устройствами, отработана техника их модернизации и укомплектования дополнительной оснасткой. После модернизации производительность машин увеличивается на 30...50 %, расширяются их функциональные возможности и гарантируется высокое качество резки.

Технические характеристики базового варианта МТР приведены ниже:

Максимальная ширина обрабатываемого листа, мм	3600
Длина рельсового пути, до, мм	24000
Диапазон толщин обрабатываемого листа, мм, при резке, мм:	
кислородной	300
плазменной с пробивкой	5...28
плазменной при врезке с края	60
лазерной	0,5...10,0
Скорость перемещения рабочего органа по осям $x$ и $y$ , м/с (м/мин):	
быстрый ход	0,33(20,0)
максимальная рабочая	0,2(12,0)
Максимальное усреднение по осям $x$ и $y$ , м/с <sup>2</sup>	2,0
Погрешность позиционирования на длине 10 м, мм	±0,2
Точность повторения, мм	±0,1
Диапазон воспроизводимых состояний	1·10 <sup>6</sup>

Машины, изготовленные и модернизированные (рис. 4, 5) в течение последних лет НПП «Укртермаш», успешно эксплуатируются на предприятиях судо- и машиностроения, металлургии, строительной индустрии Украины, Беларуси, России [1, 2].

Изложенный подход к построению МТР нового поколения на основе современного комплектного электрооборудования не только удовлетворяет требованиям международных стандартов, но и обеспечивает строгое выполнение всех заданий системы в условиях существенной нестабильности парамет-



Рис. 5. Машина «Гранат ППКП-3,2» после модернизации

ров, наличия механических резонансов и случайных изменений нагрузки.

Разработанные методы и алгоритмы управления значительно расширили сферы применения МТР и обеспечили увеличение экономической эффективности от их внедрения. Подходы к совершенствованию электроприводов и их реализация, рассмотренные в настоящей работе, обеспечивают сохранение требуемых показателей оптимизации на весь период эксплуатации приводов, «заводскую» готовность после ремонта и модернизации машин.

## Выводы

1. Применение рассмотренного подхода к динамическому синтезу регуляторов приводов подачи МТР нового поколения существенно улучшило быстродействие и уменьшило погрешности позиционирования, что привело к расширению сферы применения машин для тепловой резки и увеличению их экономической эффективности.

2. Созданная базовая модель универсальной машины для термической резки оптимальна при мелкосерийном производстве и пригодна в том числе для лазерной резки.

3. Блочно-модульная конструкция машин обеспечивает быстрое реагирование на требования заказчика и способствует дальнейшему совершенствованию производства.

1. *Верещаго Е. Н., Просянов О. Ф.* Новые машины для термической резки // Мир техники и технологий. — 2004. — № 3. — С. 14–15.
2. *Машины* термической резки нового поколения для судостроения и судоремонта / Е. Н. Верещаго, В. Ф. Квасницкий, О. Ф. Просянов, Г. Ф. Романовский // Судостроение. — 2004. — № 4–6. — С. 27.
3. *Потанов В. А.* Опыт эксплуатации лазерных и плазменных установок для резки на заводах США // Сварщик. — 2000. — № 6. — С. 32–33.
4. *Машины* нового поколения для термической резки в современном судостроении / В. М. Левшаков, В. Ф. Кириллов, Н. А. Степенкова, Ю. М. Гусельников // Свароч. пр-во. — 2003. — № 3. — С. 34–38.
5. *Управление* вентиляльными электроприводами постоянного тока / Е. Д. Лебедев, В. Е. Неймарк, М. Я. Пистрак и др. — М.: Энергия, 1970. — 200 с.
6. *Сосонкин В. Л.* Программное управление технологическим оборудованием. — Л.: Машиностроение, 1991. — 512 с.

A new approach is considered to construction of the systems of control of electric drives in thermal cutting machines proceeding from the condition of implementation of the assigned motion trajectories, aimed at expansion of the sphere of their application and improving the cost-effectiveness of their use.

Поступила в редакцию 17.06.2004

## Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики

12-я Международная конференция и выставка  
20–24 сентября 2004 г. (Ялта)

### Тематика конференции:

- Общие вопросы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД).
- Теоретические вопросы взаимодействия физических полей с веществом контролируемых объектов.
- Средства, системы, методики НК и ТД.
- Эксплуатационные характеристики и определение остаточного ресурса изделий.
- Методологическое обеспечение средств НК.
- Вопросы подготовки и аттестации специалистов, аккредитация подразделений НК и ТД.
- Исполнение Законов Украины «О стандартизации», «О подтверждении соответствия», «Об аккредитации органов по оценке соответствия» — путь повышения конкурентоспособности украинской продукции.
- Разработка стандартов в области НК и ТД.
- Заседание правления УО НКТД.

По всем вопросам, касающимся проведения конференции и выставки, обращаться к генеральному директору Украинского информационного центра «Наука. Техника. Технология»  
Главацкой Зое Юрьевне.

Тел./факс +380 44 573-3040 (с 8.00 до 14.00)  
E-mail: office@conference.kiev.ua