

УДК 621.9

В.Д. Ковалев, д-р техн. наук, Я.В. Васильченко, канд. техн. наук,
М.С. Мельник, канд. техн. наук, Краматорск, Украина

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ОБРАБОТКИ НА ТЯЖЕЛОМ ТОКАРНОМ СТАНКЕ ПОСРЕДСТВОМ PLC МОДУЛЕЙ

Розроблено структуру системи адаптивного управління швидкістю подачі важкого токарного верстату для підвищення продуктивності на чорнових операціях при одночасному захисті різального інструменту від поломок при зніманні змінного припуску і за наявності у заготовці областей підвищеної твердості.

Разработана структура системы адаптивного управления скоростью подачи тяжелого токарного станка для повышения производительности на черновых операциях при одновременной защите режущего инструмента от поломок при съеме переменного припуска и при наличии в заготовке областей повышенной твердости.

The structure of the adaptive speed control feed heavy lathe to improve performance on the roughing operations while protecting the cutting tool from damage when removing variable allowance and in the presence of the blank areas of high hardness.

Производство тяжелого оборудования является основой машиностроения Украины и важной составляющей частью ее экспорта. Возможность изготовления тяжелых машин, конкурентоспособных на мировом рынке, обеспечивается оснащением машиностроительных предприятий современным станочным оборудованием.

Станочное оборудование с позиции теории управления является многоконтурной системой с нелинейными элементами и нестационарными свойствами. При назначении оптимальных режимов резания необходимо учитывать множество факторов, связанных с фактическим состоянием заготовки, инструмента и всей технологической системы в целом. Этим и определяется актуальность оптимизации режимов механической обработки изделий тяжелого машиностроения с учетом фактического состояния процесса в режиме реального времени.

Современные системы ЧПУ позволяют использовать пре- и постпроцессоры, а также информацию от измерительных устройств, которые фиксируют параметры процесса обработки (температуру, усилия, крутящие моменты, вибрации и др.). С помощью этих средств в процессе обработки динамически корректируется начальная программа ЧПУ с режимными параметрами и геометрией инструмента. Кроме этого, есть возможность осуществления управления с системой самообучения, с переменной структурой управления, многомерными обратными связями. Для

осуществления управляющего воздействия используются и разрабатываются новые мехатронные системы.

Под руководством Б.С. Балакшина разработаны различные системы адаптивного управления станками с целью повышения их точности и производительности, более эффективного использования инструмента и оборудования, сокращения затрат на электроэнергию и т. д. [1]. Опыт эксплуатации станков с адаптивными системами показал неоднозначные результаты. Часто такие станки не обеспечивали стабильности обработки по причине неудовлетворительного качества автоматического регулирования.

Использование таких систем теоретически позволяет получить ряд положительных эффектов: повышение производительности, повышение надежности работы инструмента при черновой обработке, повышение точности формы при чистовой обработке в силу стабилизации силы резания [2-5]. Несмотря на это на машиностроительных предприятиях такие системы практически не применяются по причине необходимости установки на станок дополнительного специального оборудования, наладки этого оборудования и обучения персонала. Системы адаптивного управления для тяжелых станков пока не созданы.

Современные системы ЧПУ, в отличие от предшествующих аналогов, выполнены на основе персональных компьютеров с открытой архитектурой. Это позволяет решать задачи автоматического регулирования путём программирования соответствующих алгоритмов. Это означает, что функции ЧПУ и адаптивного управления могут быть решены на основе составления как программы обработки на станке, так и коррекции этой программы с учетом индивидуальных особенностей элементов ТС. Появляется возможность прописывать (отдельными строками) адаптивное управление в тексте управляющей программы.

Целью данной работы является разработка структуры системы адаптивного управления скоростью подачи тяжелого токарного станка, предназначенной для повышения производительности на черновых и обдирочных операциях при одновременной защите режущего инструмента от поломок при съеме переменного припуска и при наличии в заготовке областей повышенной твердости.

Для реализации системы адаптивного регулирования скорости подачи с обратной связью по силе резания на станках с ручным управлением требуется установить бесступенчато регулируемый привод подачи (если он не предусмотрен в базовой конструкции станка), систему регулирования и датчик силы резания. На станках с ЧПУ бесступенчато регулируемый привод подачи уже имеется, система регулирования может быть реализована программно на базе программируемого контроллера электроавтоматики, но необходимость в применении датчика силы резания остается. Известны попытки косвенного измерения силы резания через ток двигателя привода

главного движения, однако этот способ характеризуется крайне низкой точностью, большой инерционностью и необходимостью учитывать диаметр обрабатываемой детали, который для токарной обработки является переменной величиной.

Еще одним существенным недостатком этих систем является их неэффективность при резком изменении силы резания, например при ступенчатом изменении припуска, или при наличии в заготовке включений повышенной твердости. Он проявляется в том случае, если скорость повышения силы резания превышает скорость изменения подачи. Режущий инструмент в таких случаях, как правило, ломается, т.к. система не успевает уменьшить подачу до того, как сила резания превысит максимально допустимое значение.

Кроме того, даже при обеспечении высокого быстродействия привода подачи, система будет работоспособна, если время повышения силы резания до максимально допустимого значения и время разгона-торможения привода подачи превышает время нескольких оборотов заготовки при токарной обработке, или время прохода нескольких зубьев при фрезерной обработке. В противном случае система теряет устойчивость и входит в режим автоколебаний. Эта проблема особенно актуальна на тяжелых токарных станках, где частота вращения заготовки измеряется десятками и единицами оборотов в минуту, а время разгона-торможения современных приводов подачи – сотнями и десятками миллисекунд.

Это показано на примере модельных исследований, проведенных с помощью пакета моделирования динамических систем Matlab Simulink.

На рис. 1 представлена динамическая модель типичной системы адаптивного регулирования скорости подачи токарного станка линейного типа с пропорционально интегрально дифференциальным регулятором (ПИД регулятором). Этот тип регулятора был выбран, как обеспечивающий наилучшее качество управления.

Значение константы $P_{зад}$, которая является устройством для задания уровня силы, на котором ее требуется стабилизировать, подается на сравнивающее устройство, на второй вход которого поступает фактическое значение силы резания (измеряемое датчиком). Сигнал разности поступает на вход ПИД регулятора, который образован элементами *Gain1*, *Gain1*, *Gain1*, *Integrator1*, *Derivative* и трехвходовым сумматором. Элемент ограничения *Saturation* задает пределы изменения скорости подачи. Далее полученный управляющий сигнал подается на вход привода подачи, который в данной модели представлен инерционным звеном первого порядка *Transfer F_{сн}*. После этого звена получаем текущее значение скорости подачи V , а после его интегрирования по времени элементом *Integrator* – текущее значение координаты инструмента X в направлении рабочей подачи.

Поле умножения подачи на глубину резания получаем площадь срезаемого слоя F , которая затем умножается на передаточную функцию процесса резания $Transfer F_{cut}$ для получения значения силы резания P_z . Передаточная функция процесса резания представлена инерционным звеном первого порядка и моделирует плавное изменение силы резания при резком изменении площади срезаемого слоя, обусловленное процессами накопления и релаксации упругих деформаций в эквивалентной упругой системе станка.

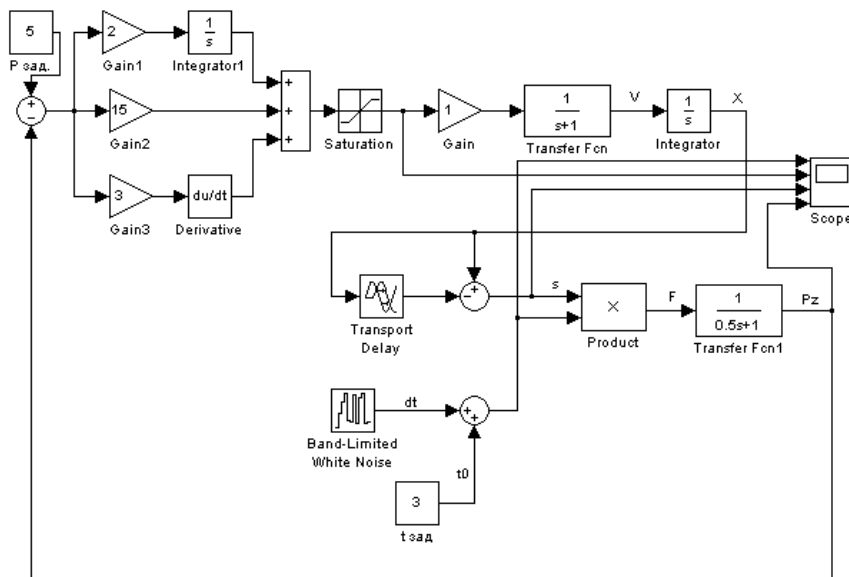


Рисунок 1 – Динамическая модель системы адаптивного регулирования скорости подачи

Для простоты в модели не учитывается влияние на силу резания скорости резания в виду ее малости, а для некоторого диапазона скоростей резания и обрабатываемых материалов – полного отсутствия этой зависимости.

Результаты моделирования выводились на четырехканальный осциллограф. Значения каналов (сверху вниз): глубина резания, управляющий сигнал привода подачи, подача на оборот (толщина срезаемого слоя), сила резания. Значения параметров системы выбирались абстрактными, поскольку задачей моделирования было только показать наличие областей устойчивости и неустойчивости при изменении частоты вращения заготовки, а сами

параметры системы на практике могут изменяться в весьма широких пределах в зависимости от типа станка и условий резания.

Было проведено два опыта. В первом параметры системы выбраны такими, чтобы обеспечивалась устойчивость процесса. Результаты этого эксперимента представлены на рис. 2.

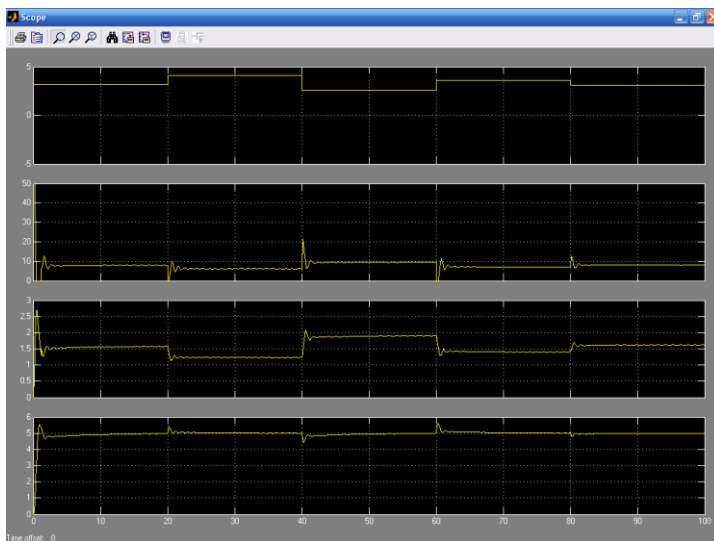


Рисунок 2

Как видно из четвертого графика сила резания достаточно стабильна при существенном и резком изменении глубины резания. Небольшие всплески силы резания в моменты изменения глубины резания обусловлены тем, что постоянная времени привода подачи выбрана больше чем постоянная времени процесса резания, что соответствует подавляющему большинству практических случаев. Таким образом, при выбранном сочетании параметров система работоспособна и эффективна.

Во втором опыте было в пять раз увеличено время задержки в элементе *Transport delay*, что соответствует уменьшению частоты вращения заготовки в такое же число раз, а также была увеличена постоянная времени процесса резания, что соответствует уменьшению скорости резания при неизменной жесткости технологической наладки. Остальные параметры остались без изменений. Результаты второго опыта представлены на рис. 3.

Как видно из графиков, система сразу входит в режим автоколебаний, что неизбежно вызовет поломку режущего инструмента. Восстановить устойчивость и работоспособность системы при заданной частоте вращения

можно путем соответствующего увеличения постоянной времени привода подачи. Но это противоречит требованиям к контурной точности привода подачи станков с ЧПУ, т.к. для обеспечения контурной точности потребуется пропорционально снижать рабочую скорость подачи, а следовательно и производительность, в результате применение такой системы теряет смысл.

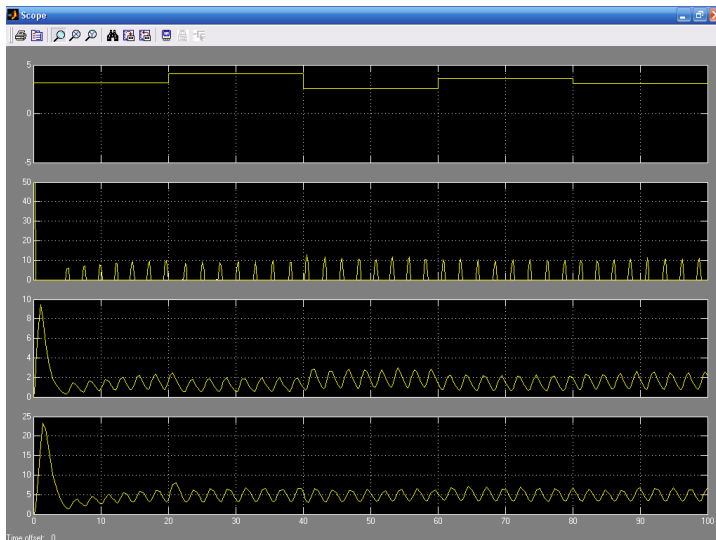


Рисунок 3

Рассмотренная система автоматического регулирования является нелинейной в силу нелинейности самого процесса резания (наличия задержки между изменением скорости подачи и соответствующим изменением толщины срезаемого слоя), и устранить эту нелинейность не представляется возможным. Для решения поставленной задачи предлагается перейти от аналогового к алгоритмическому способу управления скоростью подачи. При этом в рассмотренной динамической модели вместо регулятора помещается логический блок, реализующий требуемый алгоритм управления.

Для защиты инструмента от перегрузок при одновременном обеспечении максимальной производительности предлагается следующий алгоритм.

1. Процесс врезания выполняется с некоторой минимальной скоростью подачи V_{min} . Эта скорость выбирается в зависимости от конкретных условий обработки, с таким расчетом, чтобы сила резания не превысила максимально допустимую для режущего инструмента величину при максимально возможном увеличении припуска и твердости заготовки.

2. В течение одного полного оборота заготовки выполняется измерение силы резания и находится ее максимальное значение.

3. Вычисляется требуемая скорость подачи по формуле:

$$V = V_{min}([P_z]/P_z)^{1/y}$$

где $[P_z]$ – максимально допустимая сила резания, ограниченная прочностью режущего инструмента, P_z – максимальное измеренное за один оборот заготовки значение силы резания, y – показатель степени, характеризующий влияние подачи на силу резания для данных условий обработки [3].

4. Устанавливается рассчитанное значение скорости подачи и в течении следующего оборота контролируется сила резания. Если в течении оборота сила резания превысит значение $[P_z]$ более чем на установленный допуск – производится максимально быстрое снижение скорости подачи до значения V_{min} , после чего процесс повторяется с пункта 2. Если максимальное за текущий оборот значение силы резания оказалось в пределах допуска, то значение скорости подачи остается неизменным и повторяется данный пункт алгоритма. Если максимальное за текущий оборот значение силы резания оказалось меньше нижней границы поля допуска, то скорость подачи для следующего оборота корректируется по формуле:

$$V_{i+1} = V_i([P_z]/P_z)^{1/y}$$

где V_i – скорость подачи на текущем обороте заготовки, после чего снова повторяется данный пункт алгоритма.

Приведенный алгоритм по сути является алгоритмически реализованным гибридным регулятором, который содержит пропорционально-интегральный регулятор, поддерживающий скорость подачи на оптимальном уровне, и дискретный ограничитель, который резко снижает скорость подачи до минимального значения при превышении силой резания предельного значения. Потеря устойчивости при таком способе регулирования исключается, поскольку периоды времени, на которых происходит изменение скорости подачи, оказываются строго синхронизированы с вращением заготовки.

Характеристики, ожидаемые от такой системы следующие. Точность поддержания скорости подачи на оптимальном уровне в установившемся режиме за счет интегрирования ошибки по времени (корректировка скорости на каждом обороте заготовки в п. 4 алгоритма) определяется только точностью привода подачи по скорости и точностью измерения силы резания. Быстродействие системы при повышении скорости подачи от минимального значения до оптимального зависит от точности подбора показателя степени y и в идеальном случае составляет один оборот. Быстродействие при экстренном снижении скорости подачи определяется только быстродействием привода подачи.

В отношении третьего параметра следует заметить, что даже при мгновенной остановке движения подачи толщина срезаемого слоя и следовательно сила резания, снижаются не мгновенно, а по линейному закону в течении ровно одного оборота заготовки. Поэтому любая система адаптивного регулирования скорости подачи и защиты инструмента не может быть эффективной, если область увеличенного припуска на заготовке (например прилив на отливке), или повышенной твердости (например ползун на перетачиваемом колесе железнодорожного вагона) имеет резкие границы как в продольном так и в азимутальном направлениях, и во время обработки граница этой области совпадает с границей между витками подачи. Предохранить инструмент от поломки в этом случае возможно только уменьшив подачу на подходе к опасному участку. Датчик силы резания для этой цели не подходит, для этого требуется некий источник информации способный сигнализировать о возможном повышении силы резания с некоторым опережением. Поскольку повышение силы резания может быть вызвано несколькими причинами, то для каждой причины потребуются отдельные специфические датчики. Это сделает систему неуниверсальной и непрактичной. Учитывая все вышесказанное, не имеет смысла снижать время разгона-торможения привода подачи до величины, меньшей чем время одного оборота заготовки на максимальной частоте вращения шпинделя применительно к разработке предлагаемой системы.

В отличие от аналоговых систем, где на станок требуется устанавливать дополнительное оборудование, предлагаемая система может быть реализована исключительно программным способом на базе контроллера электроавтоматики станка с ЧПУ. В большинстве современных систем ЧПУ контроллеры электроавтоматики являются встроенными и реализованы программным или программно-аппаратным способом. Они имеют большой запас вычислительной мощности для реализации дополнительных функций и возможности работы с аналоговыми входными и выходными величинами. Единственной сложностью является датчик силы резания. Наилучшим вариантом с точки зрения точности и быстродействия был бы отдельный датчик, например, тензометрический, но это сопряжено с необходимостью изменения конструкции узлов станка для встройки датчика и потерей жесткости. При некотором ухудшении характеристик силу резания можно измерять косвенно через токи потребляемые двигателем главного движения или двигателем подачи, с последующим пересчетом по известным зависимостям.

Подобным образом реализовано управление скоростью резания для достижения оптимальной температуры посредством PLC модулей.

Для управления тяжелым токарным станком с помощью PLC модулей использована имеющаяся на кафедре «Компьютеризированные мехатронные системы, инструмент и технологии» Донбасской государственной машиностроительной академии система контурного управления для токарных

станков Heidenhain MANUALplus 620 с интегрированной возможностью управления PLC

Выводы

Адаптивное управление на тяжелом токарном станке с ЧПУ реализовано путем использования программируемого логического контролера PLC с заданием необходимых законов управления (по силе и температуре резания). Это позволяет корректировать разработанную программу ЧПУ в процессе обработки при изменении внешних воздействий на технологическую систему.

Использование систем адаптивного оптимального управления позволит сократить затраты, повысить точность, увеличить срок службы режущего инструмента.

Результаты работы внедрены на тяжелых токарных станках с ЧПУ нового поколения, выпускаемых Краматорским заводом тяжелого станкостроения.

Список использованных источников: 1. Адаптивное управление станками / Под. ред. Б.С. Балакишина, М.: Машиностроение, 1973. – 680 с. 2. Базров Б.М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков. - М.: Машиностроение, 1978. – 216 с. 3. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М., Машиностроение, 1977. – 304 с. 4. Mannan M.A., Broms S., Lindström Bo. Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements // CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 38, Issue 1, 1989. – P. 347-350. 5. Patricia A., Ralston S., Thomas L. Ward. Mathematical models used for adaptive Control of machine tools // Mathematical and Computer Modelling, Volume 11, 1988, Pages 1151-1155. 6. Силин С.С. К вопросу теоретического обоснования автоматизации процессов механической обработки по температуре резания. Труды Рыбинского авиационного технол. ин-та, № 4. – Автоматическое регулирование процессов резания по температуре. Ярославль: Изд-во Ярославского политехн. ин-та, 1976. – с. 5-11. 7. Система адаптивного управления работой тяжелого токарного станка / Ковалев В.Д. Васильченко Я.В. Мельник М.С. // Вісник СевНТУ. Серія «Машинобудування та транспорт». – 2011. – вип.118. – С.47-52.

Bibliography (transliterated): 1. Adaptivnoe upravlenie stankami / Pod. red. B.S. Balakshina, M.: Mashinostroenie, 1973. – 680 s. 2. Bazrov B.M. Tehnologicheskie osnovy proektirovaniya samopodnastrajvajushihhsja stankov . M.: Mashinostroenie, 1978. – 216 s. 3. Poduraev V.N. Avtomaticheski reguliruemye i kombinirovannye processy rezaniya. M., Mashinostroenie, 1977. – 304 s. 4. Mannan M.A., Broms S., Lindström Bo. Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements // CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 38, Issue 1, 1989. – P. 347-350. 5. Patricia A., Ralston S., Thomas L. Ward. Mathematical models used for adaptive Control of machine tools // Mathematical and Computer Modelling, Volume 11, 1988, Pages 1151-1155. 6. Silin S.S. K voprosu teoreticheskogo obosnovaniya avtomatizacii processov mehanicheskoy obrabotki po temperature rezaniya. Trudy Rybinskogo aviacionnogo tehnol. in-ta, № 4. – Avtomaticheskoe regulirovanie processov rezaniya po temperature. Jaroslavl': Izd.-vo Jaroslavskogo politehn. in-ta, 1976. – s. 5-11. 7. Sistema adaptivnogo upravljenja rabotoj tjazhelogo tokamogo stanka / Kovalev V.D. Vasil'chenko Ja.V. Mel'nik M.S. // Visnik SevNTU. Serija «Mashinobuduvannja ta transport». – 2011. – vip.118. – S.47-52.

Поступила в редколлегию 01.06.2014