

В. Ц. ЗОРИКТУЕВ, А. Р. ЗАРИПОВ**СИСТЕМА ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫМ РЕЖИМОМ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ
НА МЕХАТРОННЫХ СТАНКАХ**

Предложена модель системы логического управления температурно-силовыми режимами процесса резания металлов обусловленная сложностью технологического процесса, наличием малого объема априорной информации о форме и степени взаимосвязи между входными и выходными переменными. Приведен синтез алгоритма логического управления режимами резания. Проанализированы результаты имитационного моделирования. *Автоматизация; процесс механообработки; температурно-силовой режим процесса резания; система логического управления; процесс формализации; имитационная модель.*

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы современного машиностроительного производства во многом определяется достигнутым уровнем его автоматизации. Мехатронные станочные системы являются в настоящее время основой технического перевооружения машиностроительного производства. Интенсификация механообрабатывающего производства на основе его комплексной автоматизации в настоящее время невозможна без автоматического управления режимами обработки деталей на металлорежущих станках. Основные задачи, стоящие перед станкостроением, сводятся к повышению производительности, точности обработки и надежности металлорежущих станков [5].

Надежность и эффективность работы станочной системы, качество обработанной поверхности и, в конечном счете, эксплуатационные свойства деталей определяются, в значительной форме, температурно-силовым режимом обработки. Наиболее информативными величинами процесса резания (ПР) являются температура и главная составляющая силы резания.

В то же время вопросы, связанные с формированием оптимальной программы управления температурой и силой резания в оперативном режиме (в процессе обработки) не получили пока достаточного развития. Это обусловлено отсутствием или неадекватностью моделей управляемых процессов и сложностью процедур их идентификации, ограничениями на количество используемых средств измерения в производственных условиях, косвенным измерением информативных физических величин и значительной их зашумленностью. Проблема создания систем автоматического управления (САУ) процессом резания (ПР) обусловлена сложностью технологического процесса резания как объекта управления – его стохастичностью, нелинейностью, нестационарностью, наличием малого объема априорной информации о форме и степени взаимосвязи между входными и выходными переменными [3, 4].

Эти проблемы решаются за счет разработки новых или совершенствования существующих систем

управления (СУ), позволяющих оптимизировать процесс обработки в соответствии с требуемым критерием эффективности при существенном воздействии возмущений.

В настоящее время все больше развивается область цифровых технологий, в основе которого заложена алгебра Буля. Эти принципы находят широкое применение в различных сферах: в технической, в экономической, в промышленной. Перспектива создания компьютерной программы синтеза логических систем с требуемыми характеристиками открылась с появлением современных персональных компьютеров [6]. Отсутствие приемлемой теоретической базы по данному вопросу не позволяет в полной мере использовать современную компьютерную технику. Таким образом, созрела реальная необходимость и возможность разработки методики синтеза логических систем, которая позволила бы с помощью компьютерной программы добиваться требуемых результатов.

**СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ЛОГИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫМИ
РЕЖИМАМИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

Для создания системы управления любого уровня необходимо иметь управляемый технологический процесс, чтобы воздействовать на него для обеспечения оптимального его протекания согласно принятому критерию. Возможны две стратегии построения алгоритмов для системы логического управления. При применении первой из них считается, что известно словесное описание условий функционирования объекта и требуется построить алгоритм логического управления, обеспечивающий заданное поведение объекта. При второй стратегии, учитывая информацию о состоянии (положении) объекта, строится алгоритм управления, который обеспечивает требуемое функционирование.

Первая стратегия «направлена» от объекта управления к вычислителю, а вторая – в обратную сторону – от вычислителя к объекту. Первая стратегия базируется на понятии «состояние», вторая – на понятии «событие».

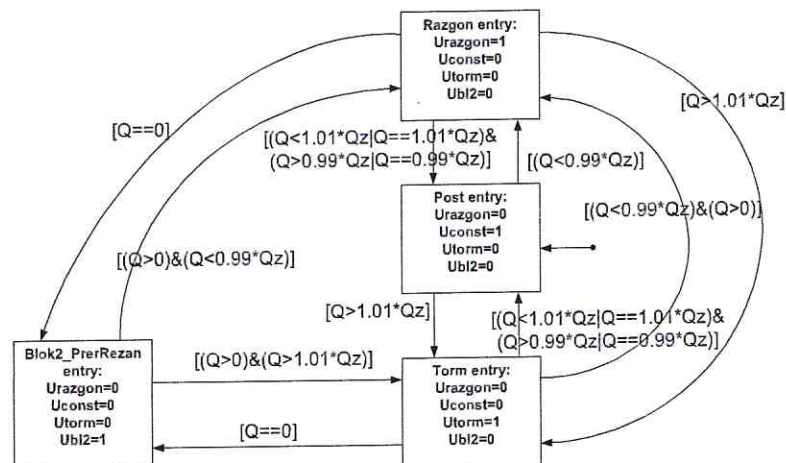


Рис. 1. Блок логического управления по температуре в зоне резания

Несмотря на то, что в настоящее время при создании алгоритмов управления, например в форме схем алгоритмов или в виде продукций (секвенций) вида «если...то», обычно используется вторая стратегия, более естественной для рассматриваемого класса задач является первая из них. Это объясняется тем, что «состояние» по своей природе статично, а «событие» динамично. Поэтому «управление по состояниям» является более целесообразным, чем «управление по событиям».

В управлении режимами процесса резания предлагается использование алгоритмов, в основе которых заложены логические функции [1]. Для решения поставленных проблем предлагается модель системы логического управления температурно-силовыми режимами процесса резания. Под логической системой управления понимается взаимодействие заранее формализованных параметров процесса резания по определенному закону.

Алгоритмы логического управления позволяют решать поставленные задачи на основе описания необходимых действий в виде «состояний» и их графов. Систему логического управления можно представить при помощи конечных автоматов, которые в настоящее время находят широкое применение. В работе система логического управления представлена в виде моделей, реализованных в программе Matlab пакет Simulink и Stateflow [2].

Моделирование по температуре резания осуществляется в соответствии с синтезом и анализом системы управления [3, 4]. Температура резания определяется в виде функции

$$\Theta = C_{\Theta} \cdot V^m \cdot S^n \cdot t^q \cdot (\sin \varphi)^{n-q} \quad (1)$$

Температура резания наиболее чувствительна к изменению скорости резания ($m > n > q$). Поэтому основным параметром при управлении температурой

резания является скорость резания V , а остальные параметры, такие как подача S , глубина резания t , угол в плане φ режущей части инструмента и другие, учитываемые коэффициентом C_{Θ} , принимаются как возмущающие факторы.

На первом этапе моделирования выделяются состояния привода, которые обеспечивают разгон, движение с постоянной скоростью и замедление в процессе работы с учетом всех условий и ограничений.

С учетом необходимых условий формируются из заранее формализованных параметров процесса резания функции перехода из одного состояния в другое. На рис. 1 представлена модель блока логического управления по температуре в зоне резания.

Перед началом работы устанавливается необходимая температура резания [3], допустимые отклонения и ограничения. Далее осуществляется моделирование, при этом с помощью датчиков контролируется состояние системы, и в соответствии с алгоритмом управления выдаются сигналы для разгона, постоянной скорости и торможения.

При моделировании по силе резания учитывается функция:

$$P_z = C_{P_z} \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p, \quad (2)$$

где C_{P_z} - коэффициент пропорциональности, определяемый для постоянных условий резания;

K_p - обобщенный поправочный коэффициент, учитывающий влияние на силу резания других факторов.

Аналогичным образом, на основе выделения основных состояний и их формализации, формируется модель логического управления по силе резания. На рис. 2 представлена модель блока логического управления по силе резания с указанием функций перехода.

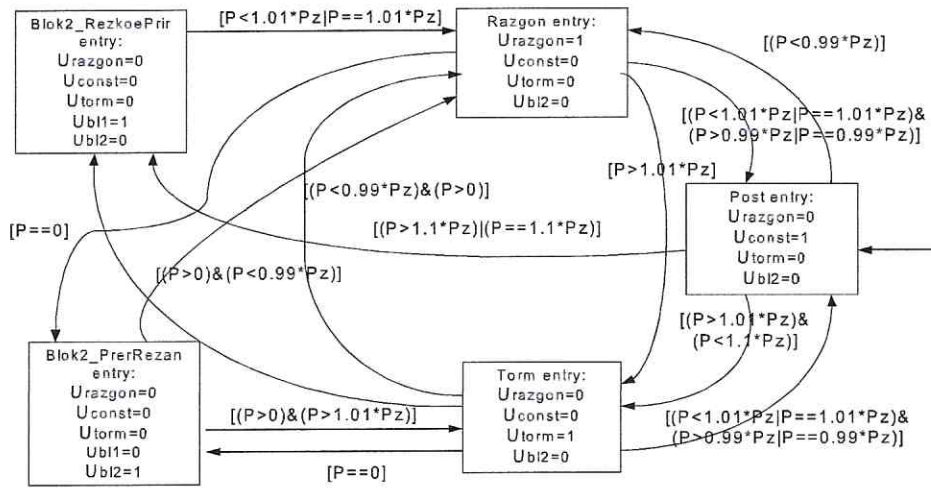


Рис. 2. Блок логического управления по силе в зоне резания

Перед моделированием необходимо определить подсистемы, в которых используется логическое управление. В рассматриваемом случае выделены две подсистемы: подсистема управления температурой резания; подсистема управления силой резания. Схема системы логического управления температурно-силовым режимом представлена на рис. 3.

СИНТЕЗ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ - ТЕМПЕРАТУРОЙ РЕЗАНИЯ

Систему управления по температуре Θ можно разделить на два блока: логический; параметрический. Логический блок (ЛБ) системы управления по температуре Θ определяет состояние, в котором должна находиться система (разгон, торможение и т. д).

Параметрический блок системы управления по температуре Θ выдает то напряжение управления, которое будет соответствовать данному состоянию системы (рис. 4).

ЛОГИЧЕСКИЙ БЛОК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ

Привод может находиться в трех состояниях: разгон; поддержание постоянной скорости; торможение. При проектировании данного блока необходимо выделить следующие состояния:

1) Состояние торможения. Логический блок (ЛБ) переходит в данное состояние при условии

$$\Theta > (1 + \Delta) \cdot \Theta_3$$

где Δ - ошибка. Допускаемая погрешность датчика термо-ЭДС (естественной термопары) составляет 1%. Для того чтобы привод все время не работал в переходных режимах «разгон-торможение», ошибку Δ необходимо принять равной допускаемой погрешности датчика термо-ЭДС. Если привод будет работать в переходных режимах «разгон-торможение» это приведет к дополнительным динамическим нагрузкам на кинематические узлы привода и, как следствие этого, к повышенному износу.

При переходе в данное состояние ЛБ формирует сигнал торможения U_T .

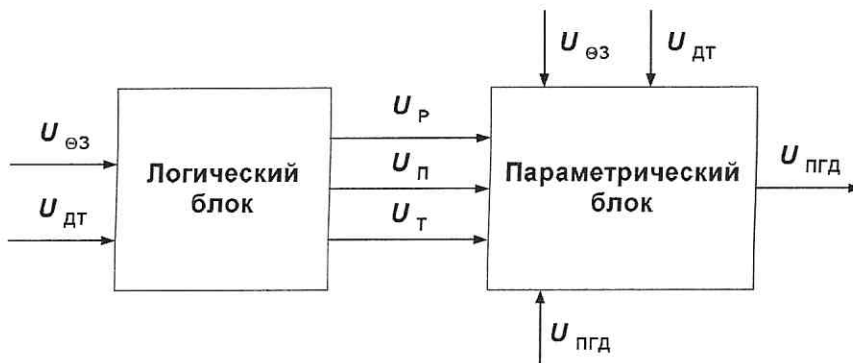


Рис. 4. Система управления по температуре Θ ; $U_{ПГД}$ - напряжение управления, подаваемое на привод главного движения; $U_{ДТ}$ - напряжение датчика температуры; $U_{\Theta 3}$ - заданная величина температуры; U_P - сигнал разгона; U_n - сигнал поддержания постоянной скорости; U_T - сигнал торможения.

2) Состояние разгона. ЛБ переходит в данное состояние при условии

$$\Theta < (1 - D) \cdot \Theta_3.$$

При переходе в данное состояние ЛБ формирует сигнал разгона U_p .

3) Состояние поддержания постоянной скорости. ЛБ переходит в данное состояние при условии

$$(\Theta > (1 - D) \cdot \Theta_3) \& (\Theta < (1 + D) \cdot \Theta_3)$$

При переходе в данное состояние ЛБ формирует сигнал поддержания постоянной скорости U_n .

Таким образом, система может находиться в одном из трех состояний, причем единичный сигнал будет проходить по одному из каналов (разгона, поддержания постоянной скорости или торможения).

4) Состояние прерывистого резания. ЛБ переходит в данное состояние при условии

$$\Theta < D \cdot \Theta_3.$$

Как было описано выше при прерывистом резании, когда изменение глубины резания (ширины сечения среза) имеет прямоугольный вид, среднее значение E необходимо поддерживать только за время резания, а в период прохождения инструмента через «воздух» управление E должно отсутствовать. Следовательно, при переходе в данное состояние ЛБ формирует сигнал $U_{пр}$, сбрасывая другие сигналы.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ БЛОК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ

1) При нахождении системы в состоянии разгона необходимо увеличивать напряжение управления, подаваемое на привод главного движения $U_{ПГД}$

$$U_{ПГД} = U_{ПГД} + \Delta U,$$

где ΔU – приращение напряжения управления.

Значение приращения ΔU зависит от отклонения текущего значения температуры резания от заданного.

Учитывая вышеизложенное, формула примет вид

$$U_{ПГД} = U_{ПГД} + k \cdot (U_{\Theta 3} - U_{ДТ}),$$

где k – коэффициент, влияющий на скорость разгона-торможения;

$U_{\Theta 3}$ – напряжение пропорциональное задан-

ному значению температуры.

Коэффициент k влияет на скорость разгона-торможения. При возрастании коэффициента k скорость торможения привода и перерегулирование будет увеличиваться. Таким образом, необходимо подобрать такой коэффициент k , чтобы перерегулирование не превышало 5%.

Напряжение управления, подаваемое на привод главного движения $U_{ПГД}$ умножается на значение сигнала разгона. Если система находится в состоянии разгона, то в канале разгона будет сигнал отличный от нуля, если же – в другом состоянии, то в канале разгона будет нулевой сигнал.

2) При нахождении системы в состоянии торможения необходимо уменьшать напряжение управления, подаваемое на привод главного движения $U_{ПГД}$

$$U_{ПГД} = U_{ПГД} - k \cdot (U_{ДТ} - U_{\Theta 3}).$$

Напряжение управления, подаваемое на привод главного движения $U_{ПГД}$ умножается на значение сигнала торможения.

3) При нахождении системы в состоянии поддержания постоянной скорости необходимо поддерживать напряжение управления, подаваемое на привод главного движения $U_{ПГД}$, не изменяя его. Напряжение управления, подаваемое на привод главного движения $U_{ПГД}$, умножается на значение сигнала поддержания постоянной скорости.

4) При нахождении системы в состоянии прерывистого резания согласно вышеописанному алгоритму необходимо поддерживать напряжение управления, подаваемое на привод главного движения $U_{ПГД}$, не изменяя его. Напряжение управления, подаваемое на привод главного движения $U_{ПГД}$ умножается на значение сигнала прерывистого резания. Далее все сигналы суммируются.

СИНТЕЗ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОЙ РЕЗАНИЯ

Система управления по силе резания также состоит из двух блоков (рис. 5): логического; параметрического.

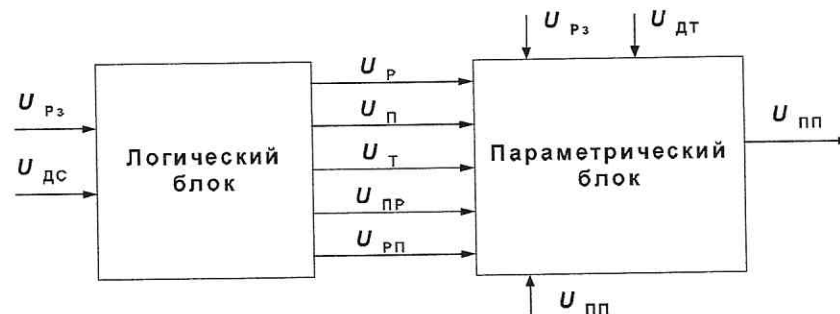


Рис. 5. Система управления по силе резания: $U_{пп}$ – напряжение управления, подаваемое на привод подачи; $U_{ДС}$ – напряжение датчика силы резания; U_{P3} – заданная величина силы резания; U_p – сигнал разгона; U_n – сигнал поддержания постоянной скорости; $U_т$ – сигнал торможения; $U_{пр}$ – сигнал прерывистого резания; $U_{рп}$ – сигнал резкого приращения

ЛОГИЧЕСКИЙ БЛОК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПО СИЛЕ РЕЗАНИЯ

В отличие от ЛБ системы управления по температуре резания, где система могла находиться всего лишь в трех состояниях: разгон; поддержание постоянной скорости; торможение, в ЛБ системы управления по силе резания, согласно [4], необходимо выделение дополнительных состояний. Таким образом, при проектировании данного блока необходимо выделить следующие состояния:

1) Состояние торможения.

ЛБ переходит в данное состояние при условии

$$P_Z > (1 + \Delta) \cdot P_{Z3},$$

где Δ - ошибка. Погрешность датчика термо-ЭДС (естественной термопары) должна быть в пределах 1%, таким образом, для того чтобы привод всё время не работал в переходных режимах «разгон-торможение», ошибку Δ необходимо принять равной погрешности датчика термо-ЭДС. Если привод будет работать в переходных режимах «разгон-торможение» это приведёт к дополнительным динамическим нагрузкам на кинематические узлы привода и, как следствие этого, к повышенному износу.

При переходе в данное состояние ЛБ формирует сигнал торможения U_T .

2) Состояние разгона. ЛБ переходит в данное состояние при условии

$$P_Z < (1 - \Delta) \cdot P_{Z3}.$$

При переходе в данное состояние ЛБ формирует сигнал разгона U_p .

3) Состояние поддержания постоянной скорости. ЛБ переходит в данное состояние при условии

$$P_Z > ((1 - \Delta) \cdot P_{Z3}) \& (P_Z < (1 + \Delta) \cdot P_{Z3}).$$

При переходе в данное состояние ЛБ формирует сигнал поддержания постоянной скорости U_n .

4) Состояние резкого приращения припуска на обработку. БЛУ переходит в данное состояние при условии

$$P_Z > (1 + \delta) \cdot P_{Z3},$$

где δ - пороговая величина перерегулирования (например, 10%) [4].

При переходе в данное состояние ЛБ с максимальным замедлением скорости движения подачи достигает минимального значения подачи. При этом обработка ведется на минимальной подаче до выполнения равенства

$$P_Z < (1 + \delta) \cdot P_{Z3}.$$

Далее ЛБ переходит в состояние разгона, так как переходы в состояния торможения и поддержания

постоянной скорости невозможны. При переходе в данное состояние ЛБ формирует сигнал U_{pn} , сбрасывая другие сигналы.

5) Состояние периодических возмущающих воздействий. ЛБ переходит в данное состояние при условии

$$P_Z < \Delta \cdot P_{Z3}.$$

В данное состояние система переходит при периодических возмущающих воздействиях с частотой, равной или кратной частоте вращения шпинделя (например, при обработке прерывистых поверхностей). Для рассматриваемого случая, когда переходный режим обусловлен возмущениями, действующими не только в направлении вектора скорости движения подачи, необходимо не только ограничить увеличение регулируемой координаты при снижении нагрузки на время меньшее $\tau_{шп}$, но и прекращать регулирование на время существенного снижения нагрузки (например, когда инструмент выходит из контакта с заготовкой), обеспечить управление при непосредственном резании материала заготовки, чтобы среднее значение силы резания в эти моменты резания было равно заданному значению P_z .

Предлагаемый алгоритм управления рассмотрим для прерывистого резания, когда подача ограничивается при кратковременном снижении нагрузки.

В самом начале обработки в момент касания инструмента заготовки t_0 (рис. 6, а, б) осуществляется интенсивное торможение привода с выдержкой этого режима в течение времени двух оборотов шпинделя и последующее включение контура регулирования в момент $t_{шп}$ (рис. 6, б). Если в этот момент $P_z < P_{Z3}$, то будет происходить увеличение P_z до момента t_2 . После этого инструмент выходит из контакта с заготовкой и сила $P_z = 0$. Если в момент t_2 сила $P_z < P_{Z3}$, то контур регулирования остается включенным, и к моменту следующего резания (время t_3) из-за большого рассогласования $\Delta P = P_{Z3} - P_z = P_{Z3}$ ($P_z = 0$) произойдет резкое увеличение подачи, в связи с этим и увеличение P_z , что может обусловить существенное перерегулирование и перегрузку инструмента. Наибольшее перерегулирование возникает, когда в момент t_2 сила P_z незначительно меньше заданной. Кратковременное прекращение регулирования возникает тогда, когда в течение оборота шпинделя возникает условие $P_z > P_{Z3}$. При $P_z = 0$ и при $P_z \ll P_{Z3}$ должно происходить резкое увеличение скорости движения подачи, что может привести к большому перерегулированию и недопустимой перегрузке инструмента.

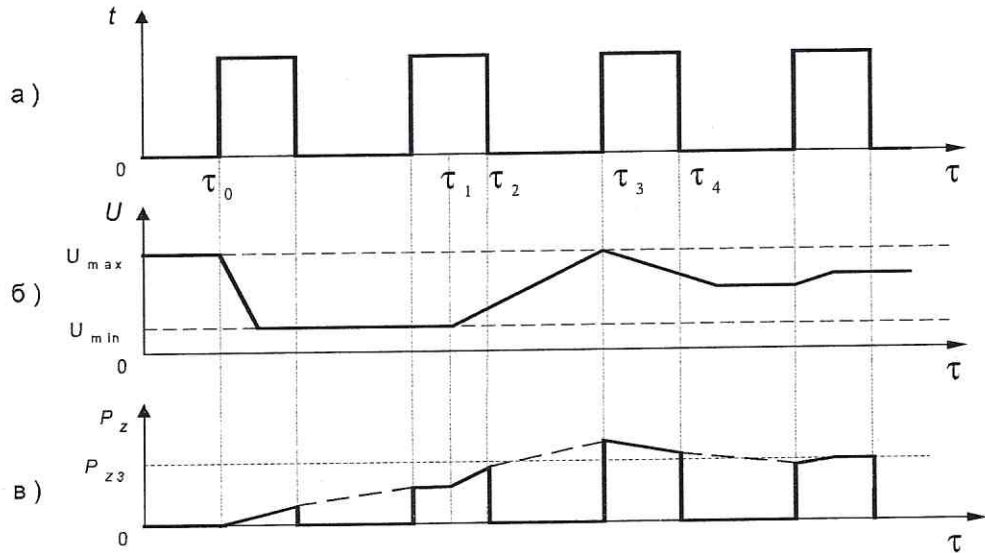


Рис. 6. Режим прерывистого резания при использовании релейного алгоритма

По новому алгоритму (прекращение регулирования при кратковременном снижении силовой координаты относительно амплитудного значения) после τ_2 (рис. 7, а, б) прекращается увеличение скорости движения подачи. При достижении $P_z = P_{z3}$ уровень подачи стабилизируется (рис. 7, б, в после $\tau > \tau_3$), и среднее значение P_z за время резания материала будет практически равно заданному P_{z3} , а перерегулирование отсутствовать. В результате исключается приводящее к перерегулированию резкое увеличение подачи в периоды при $P_z \ll P_{z3}$.

Из всего вышесказанного следует, что при переходе в данное состояние ЛБ должен выдать прежнее напряжение управления, не увеличивая. При переходе в данное состояние ЛБ формирует сигнал $U_{пр}$. Таким образом, система может находиться в одном из пяти состояний, причём единичный сигнал будет проходить по одному из каналов.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ БЛОК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПО СИЛЕ РЕЗАНИЯ

1) При нахождении системы в состоянии разгона необходимо увеличивать напряжение управления, подаваемое на привод продольной подачи $U_{пп}$

$$U_{пп} = U_{пп} + \Delta U,$$

где ΔU – приращение напряжения управления.

Причем значение приращения ΔU должно зависеть от отклонения текущего значения силы резания от заданного. Учитывая вышеизложенное, формула примет вид

$$U_{пп} = U_{пп} + k \cdot (U_{Pz} - U_{ДС}),$$

где k – коэффициент, влияющий на скорость разгона-торможения;

U_{Pz} – напряжение пропорциональное заданному значению силы резания.

Коэффициент k влияет на скорость разгона-торможения. При увеличении коэффициента k скорость разгона торможения привода будет увеличиваться, однако при этом будет увеличиваться и перерегулирование системы. Таким образом, необходимо подобрать такой коэффициент k , чтобы перерегулирование не превышало 5%.

Напряжение управления, подаваемое на привод подачи $U_{пп}$ умножается на значение сигнала разгона. Если система находится в состоянии разгона, то будет подаваться сигнал отличный от нуля, если в другом состоянии, то в канале разгона будет нулевой сигнал.

2) При нахождении системы в состоянии торможения необходимо уменьшать напряжение управления, подаваемое на привод подачи $U_{пп}$

$$U_{пп} = U_{пп} - \Delta U.$$

Как и ранее значение приращения ΔU должно зависеть от отклонения текущего значения температуры резания от заданного. Таким образом

$$U_{пп} = U_{пп} - k \cdot (U_{ДС} - U_{Pz}).$$

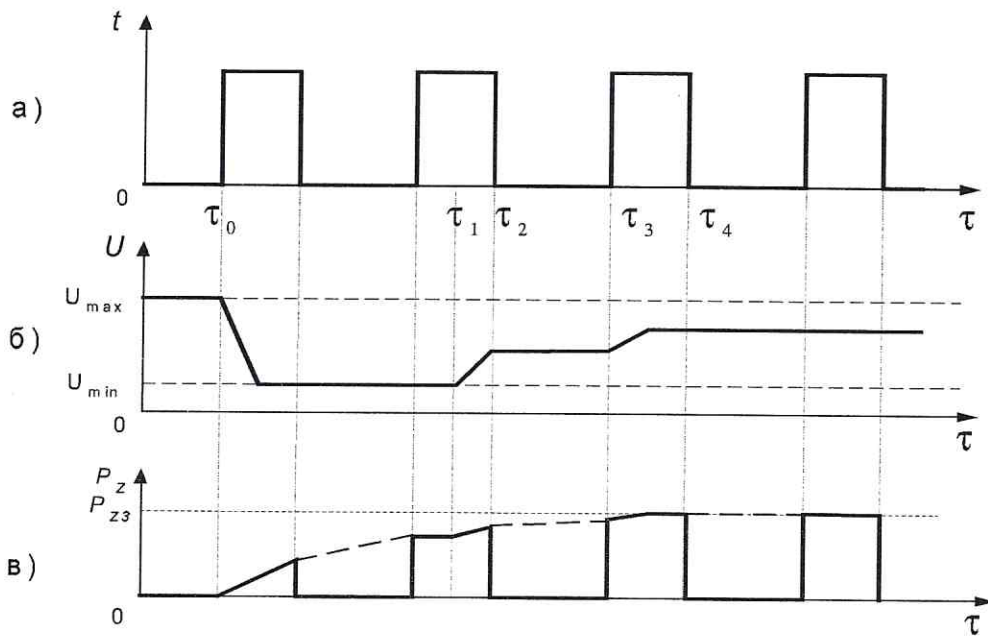


Рис. 7. Режим прерывистого резания при использовании предлагаемого алгоритма

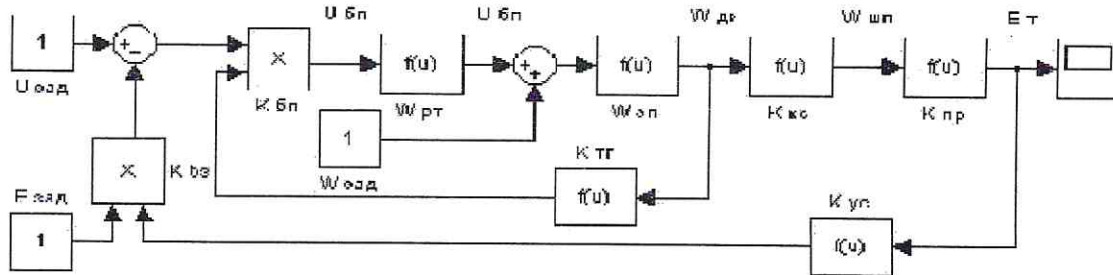


Рис. 8. Система управления на основе релейно-непрерывной схемы

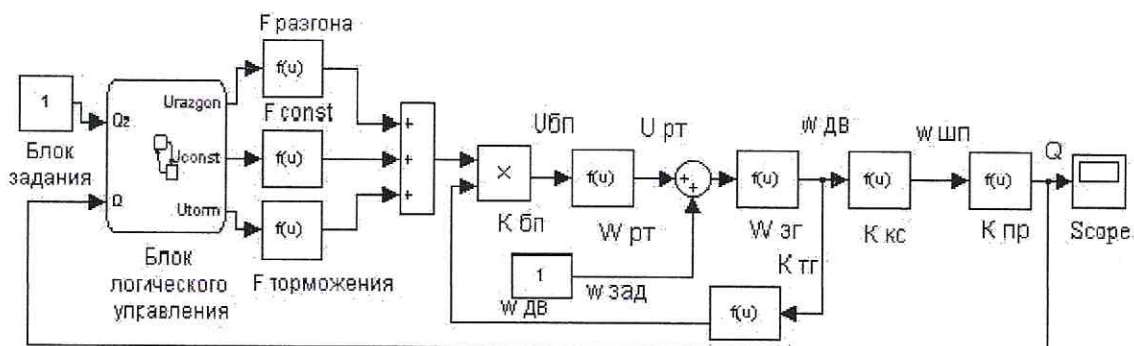


Рис. 9. Система управления с блоком логического управления по температуре в зоне резания

3) При нахождении системы в состоянии поддержания постоянной скорости необходимо обеспечить постоянное напряжение управления, подаваемое на привод подачи $U_{пп}$. Напряжение управления, подаваемое на привод подачи $U_{пп}$ умножается на значение сигнала постоянной скорости.

4) При нахождении системы в состоянии резкого приращения необходимо произвести релейное снижение скорости движения подачи с рабочей до минимальной.

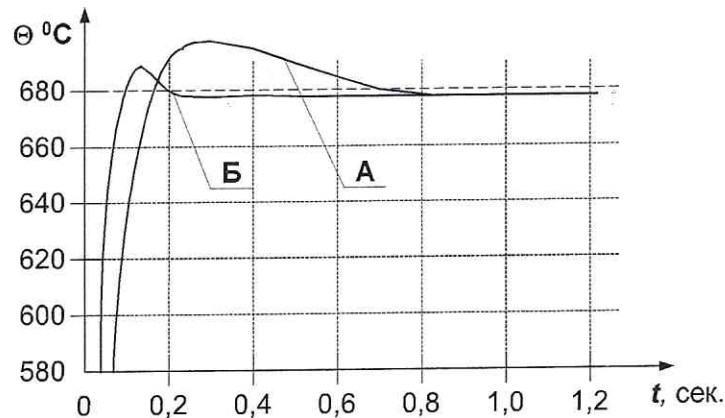


Рис. 10. Переходный процесс изменения температуры резания: А – на основе релейно-непрерывной схемы; Б – с использованием блока логического управления

Далее система должна работать на этой подаче до тех пор, пока сила не уменьшится и система не выйдет из этого состояния. Напряжение управления, подаваемое на привод подачи $U_{ПП}$

$$U_{ПП} = U_{ПП \min}$$

5) При нахождении системы в состоянии прерывистого резания согласно вышеописанному алгоритму необходимо поддерживать напряжение управления, подаваемое на привод подачи $U_{ПП}$, не изменяя его. Напряжение управления, подаваемое на привод подачи $U_{ПП}$, умножается на значение сигнала прерывистого резания. Далее все сигналы суммируются.

Для сравнительного анализа приведены схемы систем управления: составленная на основе релейно-непрерывной структуры [3, 4], показанная на рис. 8 и отдельно система управления с блоком логического управления по температуре в зоне резания (рис. 9). В основу релейно-непрерывной структуры заложены принципы управления процесса обработки [3]. Структурная схема систем реализована с помощью пакета Matlab [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано определение параметров управления процессом резания, требования, предъявляемые к системам управления температурно-силовыми режимами обработки. Смоделирован процесс резания как объекта управления (рис. 10), определены основные принципы и термины логического управления. В качестве объекта управления был взят автомат продольного точения с ЧПУ модели ЛА-155. Система логического управления температурно-силовыми режимами обработки была промоделиро-

вана в программе Matlab пакет Simulink и Stateflow [2].

Сравнительный анализ показал, что быстродействие системы с блоком логического управления выше на 25%, перерегулирование ниже на 0,368 %, что говорит о необходимости использования логического управления.

В ходе работы были выделены и проанализированы состояния режима процесса резания, разработаны алгоритмы и функциональные зависимости системы логического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Глушков, В. М. Логическое проектирование дискретных устройств / В. М. Глушков, Ю. В. Капитонова, А. Т. Мищенко. Киев : Наука думка, 1987. 262 с.
2. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0 : учеб. пособие / С. Г. Герман-Галкин. СПб. : КОРОНА принт, 2001. 320 с.
3. Зориктуев, В. Ц. Основы автоматизации и управления технологическими процессами в машиностроении / В. Ц. Зориктуев, А. Г. Буткин, А. Г. Схиртлалзе, А. Г. Лютов, Ю. А. Никитин. Уфа : УГАТУ 2000. 406 с.
4. Зориктуев, В. Ц. Управление процессами механообработки деталей авиационных двигателей в условиях неопределенности / В. Ц. Зориктуев, А. Г. Лютов. М. : изд-во МАИ, 2003. 120 с.
5. Сосонкин, В. Л. Программное управление технологическим оборудованием / В. Л. Сосонкин. М. : Машиностроение, 1991. 508 с.
6. Шальто, А. А. Алгоритмизация и программирования задач логического управления / А. А. Шальто. СПб., 1998. 628 с.