

УДК 630.323

В.В. Побединский, А.В. Берстеев

### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОРОСНИМАТЕЛЯ РОТОРНОГО ОКОРОЧНОГО СТАНКА В СРЕДЕ SIMULINK

*В статье обоснована принципиальная схема САУ пневмогидропривода короснимателя роторного окорочного станка и разработана ее модель в среде Simulink. Предложено принципиальное решение и схема обратной связи. Определена дискретная передаточная функция и разработан метод расчета ее оптимальных параметров. Для проверки адекватности модели исследован процесс работы пневмогидропривода на различных режимах.*

**Ключевые слова:** роторный окорочный станок, гидропривод, пневмопривод, окорочный инструмент, математическая модель, система автоматического управления, Simulink.

V.V. Pobedinsky, A.V. Berstenev

### THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM DEVELOPMENT OF THE ROTOR BARKING MACHINE BARK REMOVER IN THE SIMULINK ENVIRONMENT

*The automatic control system principle scheme of rotor barking machine bark remover pneumohydraulic drive is substantiated in the article. This scheme model in Simulink environment is developed. Discrete transfer function is determined and its optimum parameters calculation method is suggested. Pneumohydraulic drive work process in different modes to test model adequacy is researched.*

**Key words:** rotor barking machine, hydraulic driver, pneumo-drive, bark remover tool, mathematical model, automatic control system, Simulink.

**Введение.** Для одной из важнейших операций технологических процессов комплексной переработки древесины применяются роторные окорочные станки (РОС). Механизм режущего инструмента (МРИ) с короснимателем представляет собой узел, наиболее подверженный нагрузкам при работе станка. Для обеспечения силы прижима короснимателя к поверхности обрабатываемого ствола в некоторых современных роторных окорочных станках зарубежного производства применяется гидропривод (ГП). Однако во всех известных конструкциях не используется автоматическое управление короснимателя, что не позволяет реализовать все преимущества гидропривода.

**Цель исследований.** Разработка системы автоматического управления пневмогидропривода короснимателя окорочного станка.

#### **Задачи исследований:**

- определить способ регулирования и разработать САУ пневмогидропривода короснимателя;
- разработать передаточную функцию системы;
- разработать метод оптимизации передаточной функции;
- выполнить оптимизацию параметров передаточной функции;
- разработать имитационную модель САУ в среде Simulink;
- выполнить проверку адекватности модели САУ пневмогидропривода на основе численных экспериментов.

При окорке лесоматериала на инструменте возникает высокочастотный, динамический процесс нагрузок. Для обеспечения короснимателем с гидроприводом динамических параметров процесса необходимо, чтобы быстродействие конструкции привода было значительно выше быстродействия используемой для этой цели системы автоматического управления (САУ). Однако, как показали предварительные исследования [1], быстродействие гидропривода недостаточно для выполнения работы во всем диапазоне рабочих частот.

В данном случае была предложена конструкция, которая включает пневмо- и гидропривод с САУ, основанный на дискретном ПИД-регуляторе. Выбор именно дискретного передаточного звена регулятора обусловлен рядом преимуществ использования цифрового метода управления перед аналоговым. В дальнейшем подобную САУ легче интегрировать с другими системами автоматического регулирования технологическим процессом окорки, получая в итоге комплексную систему управления станка, построенную по модульному принципу. Такие системы легче масштабируются, более адаптивны и надежны [2].

Решая вопрос определения дискретности работы САУ, необходимо исходить из технической возможности гидравлического привода как объекта управления. Из результатов исследований [1] свойств гидропривода установлено, что он способен эффективно обрабатывать возмущающие воздействия единичной амплитуды частотой не более 500 Гц, или время реакции на единичное возмущение составляет не более 0,002 с.

Следовательно, для обеспечения эффективности динамических характеристик ГП нужно задаться характеристикой частоты работы САУ периодом  $T_{0,P}$  дискрета не менее 0,003 с.

Разработанная структурная схема цифрового ПИД-регулятора гидравлического привода короснимателя представлена на рисунке 1,б. В соответствии со схемой, приведённой на рисунке, математическим описанием [1] гидравлического привода была разработана имитационная модель в среде Simulink приложения MatLab. Так как рассматриваемая модель ГП представляет собой интегральное звено, то для использования её в схеме управления короснимателем необходимо ввести отрицательную обратную связь с контуром управления ГП, обеспечивающим наилучшее быстродействие системы.

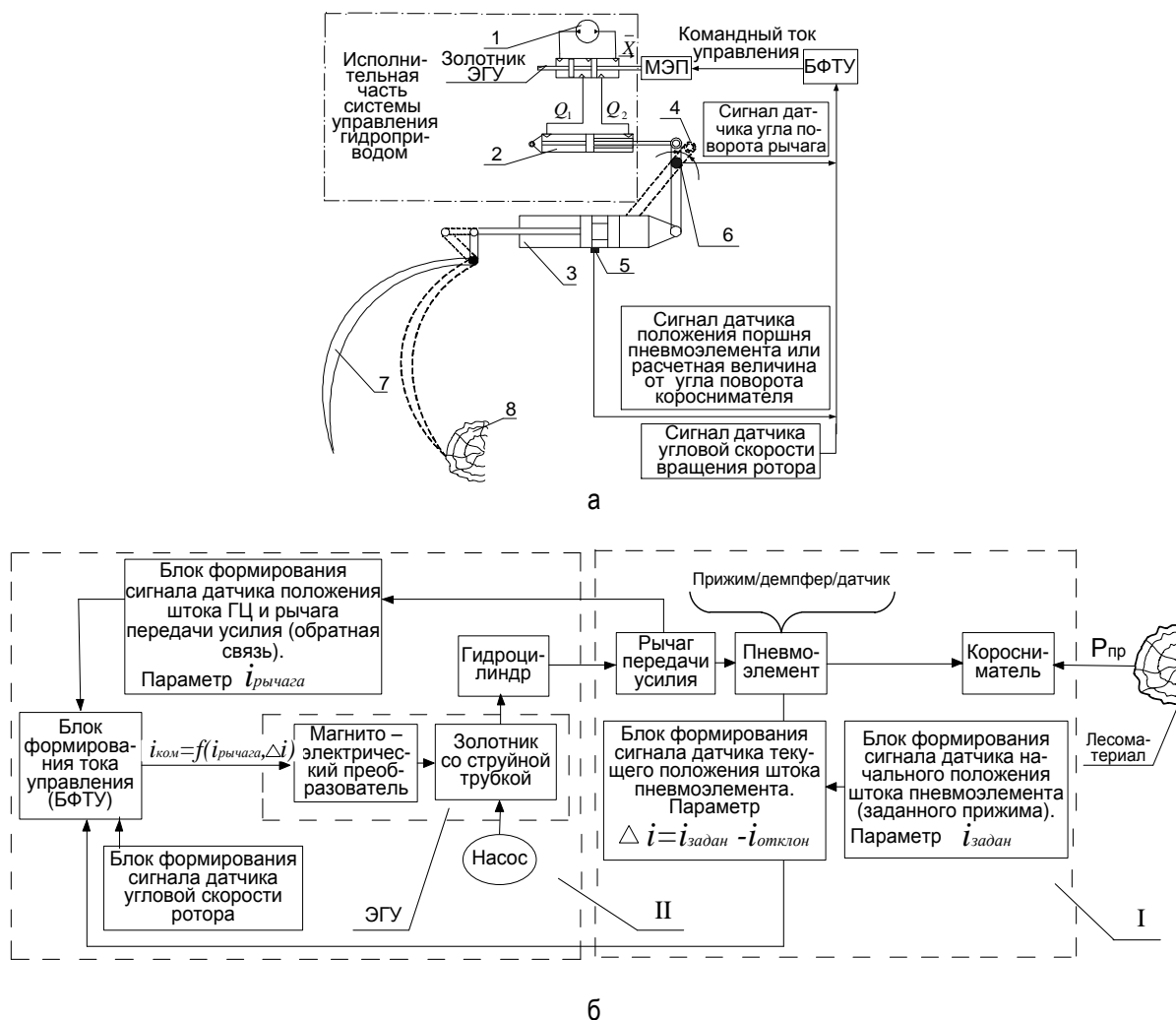


Рис. 1. Коросниматель с автоматическим управлением пневмогидроприводом:  
 а – принципиальная схема; б – структурная схема; ЭГУ – электрогидравлический усилитель;  
 МЭП – магнитоэлектрический преобразователь; САУ – система автоматического управления;  
 1 – гидравлический насос; 2 – гидроцилиндр; 3 – пневматический элемент; 4 – рычаг передачи  
 усилия; 5 – датчик положения поршня пневмоэлемента; 6 – датчик угла поворота рычага передачи  
 усилия (датчик обратной связи); 7 – коросниматель; 8 – лесоматериал

На схеме рисунка 2,а показана структурная схема цифрового ПИД-регулятора. Входное воздействие  $\Delta i_{зад}$  формируется по датчику положения штока пневмоэлемента  $\Delta i$  (рис. 3,а). Управление осуществляется по рассогласованию задающего воздействия и сигнала  $\Delta i_{расч}$ , поступающего с выхода блока «компенсатор ДОС» (рис. 2,в). Для обеспечения требуемых динамических характеристик ГП введён регулятор, представленный пропорциональной составляющей  $Kr_p$  и дифференциальной составляющей. Дискретная передаточная функция  $W_0$  ПИД регулятора определяется из следующего выражения:

$$W_{\delta} = \frac{Td_{_p} - TO_{_p} \cdot z^{-1}}{A0_{_P} - A1_{_P} \cdot z^{-1}} \quad (1)$$

где  $Td_{_p}$  и  $Kp_{_p}$  – коэффициенты пропорциональности;

$TO_{_p}$  – период дискретизации;

$A0_{_P}$ ,  $A1_{_P}$  – коэффициенты дискретного фильтра, определяются по формулам:

$$A0_{_P} = \alpha_{d_{_p}} \cdot Td_{_p} + TO_{_p} / 2,$$

$$A1_{_P} = \alpha_{d_{_p}} \cdot Td_{_p} - TO_{_p} / 2,$$

где  $\alpha_{d_{_p}}$  – постоянный параметр передаточной функции ( $\alpha_{d_{_p}} = 0,01$ )

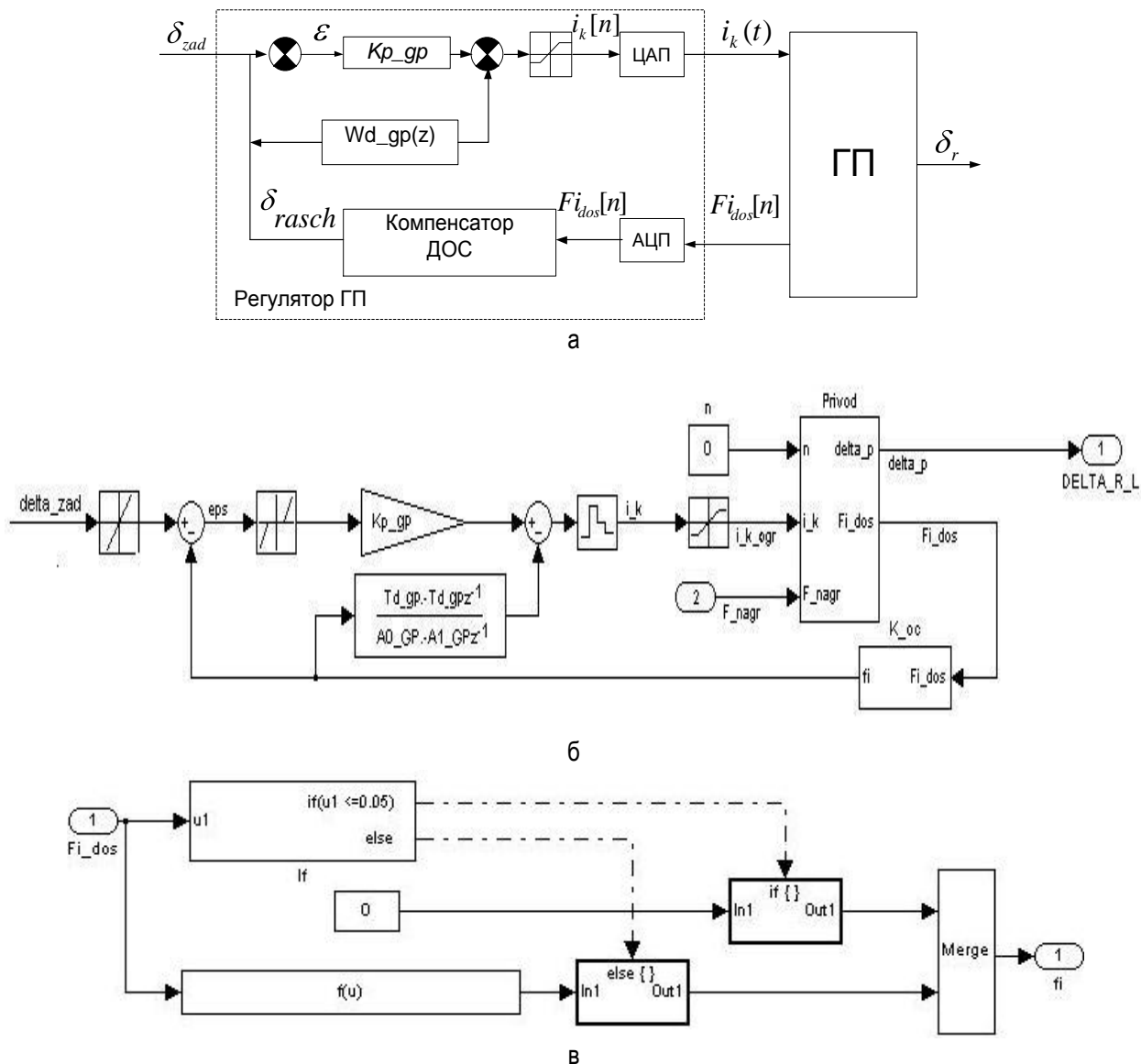


Рис. 2. Элементы модели САУ пневмогидропривода короснимателя:  
 а – структурная схема цифрового ПИД-регулятора ГП; б – схема моделирования  
 автоматического управления ГП; в – схема модели компенсатора ДОС

На первых этапах разработки такого дискретного фильтра коэффициенты вначале задавались экспертным путем исходя из физического смысла и для обеспечения достаточно корректной работы, а затем оптимизирова-

лись с использованием процедуры «Signal Constraint» приложения MatLab системы оптимизации параметров передаточной функции. В этом случае задавались граничные значения на переходные процессы при обработке единичного сигнала в виде ступеньки (см. рис. 3,а). Оптимизация выполнялась по алгоритму итерационного процесса варьирования коэффициентов  $Td_p$ ,  $Kp_p$  передаточной функции (1) и периода дискретизации  $T0_p$ .

Функциональная зависимость  $f(u)$  в модели блока «компенсатор ДОС» (рис. 2,в) была реализована следующим образом. Угол поворота вала датчика  $Fi\_dos$  зависит от задающего угла  $delta\_zad$ , поэтому для формирования компенсатора была подобрана эта зависимость по приведенной ниже схеме.

Сначала были сняты значения угла  $Fi\_dos$  при различных значениях задающего угла  $delta\_zad$  (рис. 3,б). Из графика видно, что полученная зависимость является нелинейной. Наибольшее отклонение от линейной характеристики наблюдается при больших задающих значениях угла  $delta\_zad$ . Поэтому нельзя замыкать контур обратной связи по датчику поворота непосредственно. Необходимо введение промежуточного звена, которое должно компенсировать нелинейную зависимость задающего значения с системы управления и значения на выходе ГП (компенсатор датчика обратной связи (ДОС)), используя аналитическую зависимость между этими сигналами.

Для получения аналитического выражения аппроксимирующей кривой был использован пакет подгонки кривых «Curve Fitting Toolbox» системы Matlab. Так была получена кривая зависимости  $delta\_rasch$  ( $Fi\_dos$ ) и её аналитическое выражение в виде полинома третьего порядка (рис. 3,а). Чтобы учесть все возможные люфты и зоны нечувствительности, в модели введён блок «If» (рис. 2,в). Рассогласование задающего воздействия  $delta\_zad$  и сигнала  $delta\_rasch$  преобразуется в командный ток  $i_k$ , ограничением которого получен ток  $i_{k\_огр}$ , поступающий непосредственно на вход модели ГП (рис. 3,б).

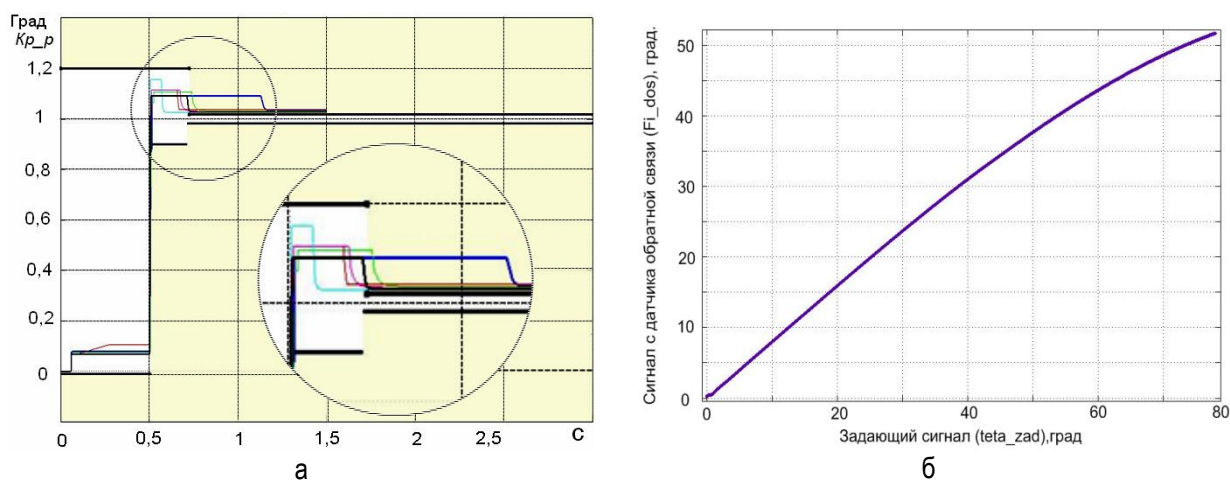


Рис. 3. Оптимизация переходного процесса гидропривода: а – фрагмент результатов оптимизации на переходных процессах в Simulink-формате (незатененной частью графика в MatLab предусмотрено выделение области допустимых значений функции); б – зависимость  $delta\_rasch$  ( $Fi\_dos$ )

Разработанная имитационная модель предусматривает работу пневмогидропривода с системой автоматического управления. На заключительном этапе разработки проверка ее адекватности возможна путем подачи на вход управляющего воздействия заданного уровня и оценки отклика органа управления, в данном случае рычага передачи усилия.

Управляющим воздействием для ЭГУ гидропривода является командный ток управления. В системе принят диапазон изменения тока управления от плюс 40 до минус 40 мА. Знак величины командного тока определяет положение струйной трубки ЭГУ, а следовательно, распределение давлений в полостях ГЦ. Изменение тока в положительном диапазоне вызывает выдвигание штока ГЦ, а значит, опускание короснимателя в диапазоне от 5 до 58 градусов и обратно, изменение в отрицательном – подъём короснимателя. Абсолютная величина значения тока задаёт скорость распределения давления в полостях ГЦ, а значит, скорость движения короснимателя.

Таким образом, задавая уровень сигнала, появляется возможность управлять характером перемещений короснимателя, его скоростью вращения и оценивать возникающие нагрузки.

Проверка адекватности модели выполнялась на основе численных экспериментов. В этом процессе при исследовании динамических характеристик гидроцилиндра проводились две серии экспериментов: в режиме холостого хода (на коросниматель не оказывается нагрузка) и в режиме максимальной нагрузки на рабочей кромке короснимателя в 300 Н/см.

В ходе исследований были выявлены следующие характерные особенности работы конструкции с автоматическим управлением.

При выдвигении штока ГЦ время запаздывания на начало отработки задающего воздействия составляет 3,5 мс. Время выхода на упор рычага передачи усилия – 60 мс.

При втягивании штока время запаздывания на начало отработки составляет 3 мс. Время выхода на упор рычага – порядка 70 мс.

При выдвигении штока ГЦ выходит на упор в течение 65 мс, а при втягивании – в течение 75 мс.

В режиме холостого хода скорость выдвигения штока (участок периода времени 0–0,1 с) составляет 4,65 м/с, угловая скорость короснимателя 861 град/с. Аналогично скорость втягивания штока (участок времени 0,1–0,5 с) составляет 4,03 м/с, угловая скорость рычага достигает 746 град/с. В момент достижения штоком упора его скорость принимает нулевое значение.

В характере работы гидропривода при максимальной нагрузке на рабочей кромке короснимателя в 300 Н/см проявляется инерционность конструкции, затрачивается большее время на выполнение процесса раскрытия-закрытия короснимателя. Так, скорость выдвигения штока (участок периода времени 0–0,1 с) составляет 4,2 м/с, угловая скорость короснимателя 840 град/с. Аналогично скорость втягивания штока (участок времени 0,1–0,5 с) составляет 3,63 м/с, угловая скорость рычага – 728 град/с.

Для обоих случаев моделирования скорость выдвигения штока ГЦ до 13,5 % выше, чем скорость втягивания. Такой эффект обусловлен неравномерностью нагрузки на гидропривод при его движении в разные стороны. Так, при опускании короснимателя действие производится только за счёт усилия прижима гидропривода с учётом отрицательного вклада центробежной силы, действующей на управляемый элемент. При поднятии короснимателя к усилию гидропривода с положительным знаком добавляются центробежная сила и динамическая нагрузка со стороны обрабатываемой поверхности.

Отсюда следует, что для улучшения динамических характеристик расчетное усилие гидроцилиндра при втягивании следует принимать с учетом снижения эффективной площади сечения штоковой области ГЦ.

В целом полученные результаты достаточно согласуются с реальными процессами, наблюдаемыми в гидроприводе, и экспериментальными данными по процессу окурки.

При синтезе модели ГП, для обеспечения требуемых технических характеристик, его параметры задавались в следующих диапазонах:

- зона нечувствительности магнитоэлектрического преобразователя,  $\bar{i}_{zn} \leq 0,08$ ;

- относительное смещение середины зоны нечувствительности

МЭП от конструктивных факторов,  $\left| \bar{i}_{смк} \right| \leq 0,11$ ;

- относительный командный ток насыщения,  $\bar{i}_{ск1} = 0,25 \dots 1$ ;

- относительное перемещение струйной трубки, при котором

происходит насыщение силовой характеристики,  $\bar{X}_F = 0,7 \dots 1$ ;

- постоянная времени золотника,  $T_z = (2,5 \dots 3) 10^{-3}$  с;

- давление на входе золотникового распределителя,  $P_{вх} = 25,077 \dots 70,697$  Мпа.

Для исследования работы привода были рассмотрены четыре набора параметров в двух режимах: без моделирования внешней нагрузки и с использованием в модели внешней нагрузки.

Первые два набора параметров (worst и best, рис. 4) подбирались итерационным методом, как худший и наилучший варианты работы гидропривода в заданных диапазонах значений параметров. Варианты min и max – это процессы, характеризующие работу гидропривода при соответственно минимальных и максимальных значениях параметров из диапазонов для следующих значений:

- worst – худший вариант без внешней нагрузки;
- best – лучший вариант без внешней нагрузки;
- max – максимальные значения параметров в случае без внешней нагрузки;
- min – минимальные значения параметров в случае без внешней нагрузки;
- worst\_load – худший вариант при действии внешней нагрузки 200 Н;

- best\_load – лучший вариант при действии внешней нагрузки 200 Н;
- max\_load – максимальные значения параметров в случае с внешней нагрузкой;
- min\_load – минимальные значения параметров в случае с внешней нагрузкой.

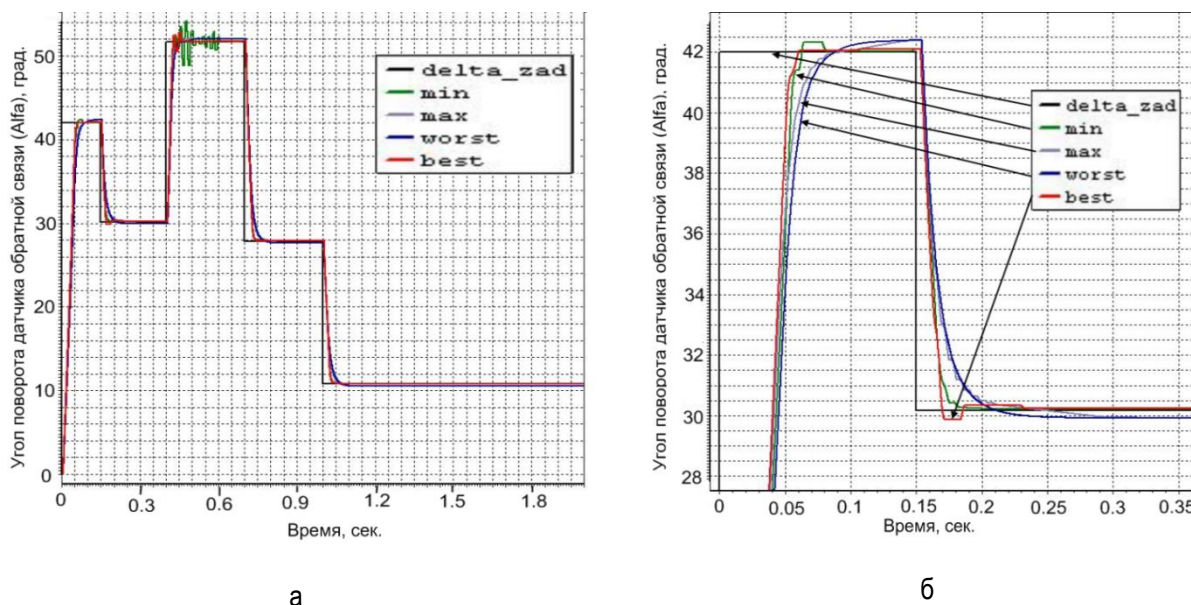


Рис. 4. Моделирование процесса управления гидропривода короснимателя: а – процесс регулирования в зависимости от параметров пневмогидропривода; б – отработка задающего воздействия в зависимости от толщины лесоматериала

Модельный эксперимент показал, что изменение рассматриваемых параметров в заданных диапазонах не имеет явно выраженного влияния на характер выходного сигнала при малых углах подъема короснимателя, а отличия в процессе регулирования начинают проявляться на больших углах. При введении внешней нагрузки величиной 300 Н/см изменение значений параметров не влияет на процесс. Разница задающего и фактического перемещения короснимателя в этом случае составляет 1,5 градуса. Исследования показывают, что ГП будет работать не хуже, чем в случае worst\_load.

Последующая проверка адекватности модели выполнялась в ходе имитационного моделирования процесса управления работой короснимателя по разработанной в среде Simulink программе.

Модельные эксперименты позволяют судить о времени запаздывания на начало отработки задающего воздействия и о времени выхода на упор управляющих органов при выдвигании штока ГЦ.

При выдвигании управляющих органов время запаздывания на начало отработки составляет 3,5 мс. Время выхода на упор управляющих органов – 70 мс.

При втягивании управляющих органов время запаздывания на начало отработки составляет 3 мс. Время выхода на упор управляющих органов – 320 мс.

При выдвигании штоков ГЦ выходит на упор в течение 50 мс, а при втягивании – в течение 280 мс.

Для дальнейших расчетов принимаются наибольшие расхождения выходного и задающего сигналов как наиболее неблагоприятные значения характеристик процесса управления. В этом случае для предложенной САУ обеспечивается гарантированный запас точности регулирования.

### Выводы

1. Разработанная САУ, схема которой показана на рисунке 1, может быть использована для автоматического регулирования МРИ окорочного станка.
2. Для обеспечения динамических характеристик привода следует использовать регулятор с пропорциональной и дифференциальной составляющей.
3. Предложенная дискретная передаточная функция ПИД-регулятора определяется из выражения (1), а расчет ее оптимальных коэффициентов выполняется по разработанной методике.

4. Разработанная имитационная модель САУ пневмогидропривода может быть использована для расчета параметров при проектировании конструкции механизма режущего инструмента.

5. Проверка на адекватность модели САУ показывает достаточную точность работы пневмогидропривода короснимателя в диапазоне рабочих частот процесса.

### Литература

1. *Побединский В.В., Берстнев А.В.* Математическая модель гидропривода рабочего органа роторного окорочного станка // Сб. докл. к междунар. науч.-техн. конф. УГЛТУ (Екатеринбург, 21–23 сентября 2006). – С. 87–92.
2. *Ричард К., Дорф К., Роберт Х.* Современные системы управления. – М.: Изд-во Лаб. базовых знаний, 2004. – 831 с.



УДК 631.35:629.03.001.5

*М.В. Канделя*

### ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ МОБИЛЬНЫХ УБОРОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

*Рассмотрены мобильные уборочно-транспортные машины высокой проходимости. Приводится описание научных и производственно-конструкторских разработок ходовых систем нового поколения, которые позволяют повысить производительность и долговечность машин, реализовать принципы ресурсосбережения и экологически допустимого воздействия на почву.*

**Ключевые слова:** гусеничный движитель, мобильные уборочно-транспортные машины, почва, переувлажнение.

*М. V. Kandelya*

### WAYS FOR TECHNOLOGICAL LEVEL IMPROVEMENT OF CATERPILLAR TRACK MOVER IN MOBILE HARVESTERS AND TRANSPORT MACHINES

*Mobile harvesters and transport machines of high trafficability are considered in the article. The scientific, production and design development description of new generation running systems that allow to increase machines productivity and durability, to realize principles of the resources cost-effective use and ecologically admissible impact on the soil is provided.*

**Key words:** caterpillar track mover, mobile harvesters and transport machines, soil, over wetting.

**Введение.** Мобильные уборочно-транспортные машины на гусеничных ходовых системах находят широкое применение на Дальнем Востоке во многих отраслях народного хозяйства. Прежде всего – это сельскохозяйственное производство и особенно уборка риса, сои и других культур в специфических условиях переувлажнения почв; разведка и освоение полезных ископаемых и заготовка сырьевых ресурсов в условиях бездорожья; обеспечение сезонной доставки оленеводов в дистанционные стойбища, рабочих на вахтовые прииски и создание бытовых условий на передвижных бытовых модулях; строительство новых транспортных артерий при освоении природных богатств, в т.ч. прокладка газо- и нефтепроводов.

Дальний Восток в XXI веке является довольно привлекательным регионом России, где требуется использование в больших масштабах машин высокой проходимости. Мировой и отечественный опыт позволяет создавать большой парк транспортных средств для обеспечения проходимости мобильных машин: колесные движители с двумя, тремя и более ведущими мостами (автомобили повышенной проходимости, БТР, тягачи), автомобили со специальными пневмоколесами и пневмокатками с низким давлением, гусеничные и полугусеничные шасси, амфибии и другие средства.