

2. Разработанная имитационная модель позволяет определять степень влияния обратной связи по угловой скорости бурового снаряда на качество переходных процессов.

3. Система управления скоростью вращения буровой колонны с обратной связью по угловой скорости бурового снаряда позволяет определить рациональные значения коэффициента обратной связи для получения желаемых переходных процессов.

#### Список литературы

1. Ковшов Г.Н., Инклинометры (основы теории и проектирования) / Г.Н. Ковшов, Р.И. Алимбеков, А.В. Шибер – Уфа : ГИЛЕМ, 1998. – 380 с.
2. Ковшов Г.Н., «Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении» / Ковшов Г.Н., Коловенртнов Г. Ю - УФА 2001 - 228 с.
3. Ковшов Г.Н., Ужеловский А.В «Исследование характера зависимости показаний акселерометра от влияния температуры окружающей среды». Г.Н.Ковшов, А.В. Ужеловский- Наукова весна 2013. Збірник наукових праць. Дніпропетровськ 2013
4. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер - Учеб. Пособие для вузов/ – М.: Энергия, 1979. – 616 с., ил.
5. Зимин Е.Н. Автоматическое управление электроприводами / Е.Н. Зимин, В.И. Яковлев / Учеб. Пособие для студентов вузов.- М.: Высш.школа, 1979. -318 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мещеряковим Л.І.  
Надійшла до редакції 05.03.2014*

УДК 622.232.72:004.942

© А.В. Бубликов

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА**

В статье анализируются переходные процессы в нескорректированной системе автоматического управления перемещением стрелового исполнительного органа проходческого комбайна. Обосновываются недостатки реализации системы автоматического управления перемещением исполнительного органа на основе трехпозиционного электромагнита в составе пилотного электрогидрораспределителя.

В статті аналізуються перехідні процеси в нескорегованій системі автоматичного керування переміщенням стрілового виконавчого органу прохідницького комбайну. Обґрунтовуються недоліки реалізації системи автоматичного керування переміщенням виконавчого органу на основі трьохпозиційного електромагніту у складі пілотного електрогідророзподілювача.

The transient processes in noncorrected automated system of control by moving of roadheader's executive body are analysed in the article. The disadvantages of realization of automated system of control by moving of roadheader's executive body, based on three position electromagnet as part of electrohydraulic control valve, are grounded.

**Вступление.** В проходческих работах с точки зрения технологии разработки угольного пласта важно поддерживать направление выработки, заданные форму и площадь ее поперечного сечения. Для выполнения этих задач больше всего приспособленный проходческий комбайн со стреловидным исполнительным органом, но качество решения задач зависит от точности позиционирования исполнительного органа при его перемещении по заданной оператором траектории. От того, насколько качественно проведена выемка пачки угля на текущем шаге комбайна, зависит продуктивность проведения выработки и степень ручного труда. Поэтому для исключения человеческого фактора и обеспечения необходимых показателей качества формирования выработки перемещение исполнительного органа проходческого комбайна должно осуществляться в автоматическом режиме. Причем главным требованием к переходному процессу перемещения исполнительного органа с позиции его точного позиционирования является нулевая статическая ошибка. Также выдвигаются второстепенные требования – отсутствие колебательных переходных процессов в системе автоматического управления (САУ) и как можно меньшее время перемещения исполнительного органа (ИО).

С учетом выдвинутых требований к системе автоматического управления перемещением стрелового исполнительного органа должны быть проведены исследования переходных процессов, которые протекают в системе при перемещении исполнительного органа в автоматическом режиме. С этой целью поставлена задача разработать имитационную модель системы автоматического управления перемещением стрелового исполнительного органа проходческого комбайна.

**Последние достижения.** На сегодня управление перемещением исполнительного органа всех проходческих комбайнов современного поколения происходит в ручном режиме [1]. Это объясняет отсутствие научных работ, посвященных изучению переходных процессов при автоматическом управлении перемещением исполнительного органа. Однако, ввиду актуальности вопроса автоматизации данного процесса, имеет смысл исследовать качество позиционирования исполнительного органа, если управление его перемещением происходит в автоматическом режиме. Особенно, если в состав пилотного электрогидрораспределителя входит дискретный электромагнит, что имеет место на всех современных проходческих комбайнах.

**Изложение основного материала исследований.** По виду преобразуемых энергий условно можно выделить две составляющие САУ гидроприводом перемещения ИО – электромеханическую и гидромеханическую. К первой составляющей относятся усилитель электрического сигнала 1, электромагнит пилотного электрогидрораспределителя (ЭГР) 2 и датчик поступательного движения штока гидродомкрата 6 (рис.1). В состав второй составляющей входят пилотный электрогидрораспределитель 3, силовой гидрораспределитель 4 и гидродомкрат гидропривода перемещения ИО 5 (рис.1).

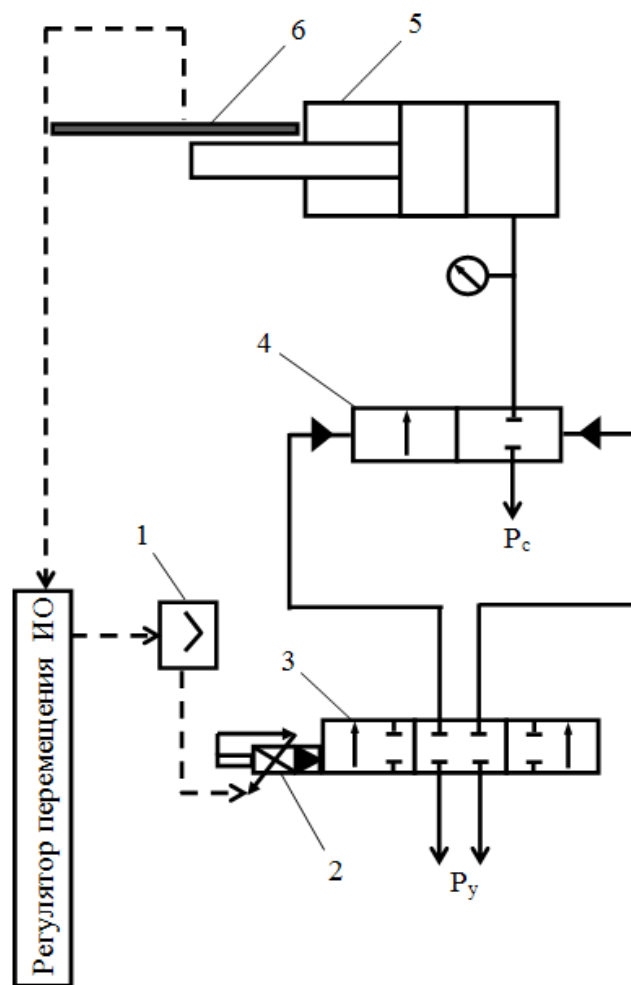


Рис. 1. Функциональная схема гидропривода перемещения ИО проходческого комбайна

Приведем описание имитационных моделей элементов электромеханической составляющей САУ перемещением стрелового ИО проходческого комбайна и осуществим расчет их параметров. При этом отметим, что конструктивные и технические параметры всех элементов взяты для проходческого комбайна П110. Усилители электрического сигнала обычно задаются апериодическим динамическим звеном вида:

$$W_{\text{эл.ус}}(p) = \frac{K_y}{T_y \cdot p + 1} = \frac{\bar{U}}{\Delta L},$$

где  $\Delta L$  – отклонение фактического перемещения штока гидродомкрата гидропривода ИО от уставки, заданное в относительных единицах, %;  $U$  – напряжение, подаваемое на обмотки электромагнита, В;  $T_y$  – постоянная времени усилителя (0,0015 с);  $K_y$  – коэффициент усиления усилителя, который определяется как отношение выходной величины элемента к входной в статическом режиме:

$$K_y = \frac{U}{\Delta L_{\text{max}}} = \frac{24}{100} = 0,24, \text{ B/\%}.$$

С учетом того, что управление перемещением штока гидродомкрата ведется по отклонению фактического положения штока от заданного и электромагнит должен срабатывать при любых отклонениях, а не только максимальном  $\Delta L_{max}$ , его статическая характеристика задана так, как показано на рис.2. Также учтено, что электромагнит является поляризованным и трехпозиционным, однако при этом принято допущение об отсутствии гистерезиса из-за его незначительности.

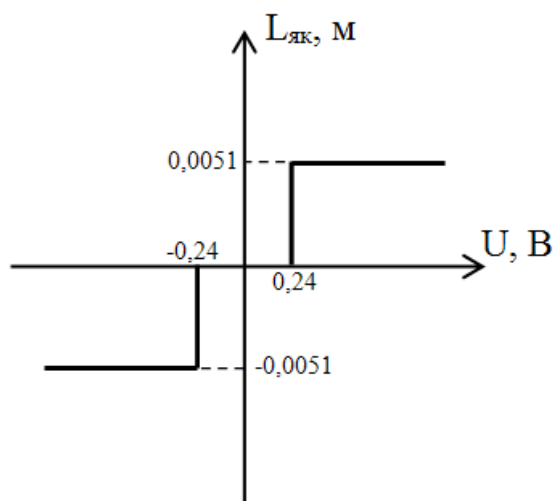


Рис. 2. Статическая характеристика трехпозиционного электромагнита

На рис.2:  $L_{як}$  – перемещение якоря электромагнита, которое является выходной величиной данного элемента САУ, м. Зона нечувствительности статической характеристики взята  $\pm 0,24$  В. Ход якоря электромагнита 0,0051 м. Инерционность перемещения якоря электромагнита учтена посредством ограничения скорости перемещения якоря на таком уровне, при котором якорь достигает своего крайнего положения за 0,03 с (согласно технической характеристике электромагнита).

Датчик поступательного перемещения штока гидродомкрата гидропривода ИО задаем усилительным звеном с коэффициентом усиления, равным:

$$K_y = \frac{L_{шт.отн}}{L_{шт}} = \frac{100}{1,5} = 66,667, \text{ \%}/\text{м},$$

где  $L_{шт}$  – фактическое перемещение штока гидродомкрата, м;  $L_{шт.отн}$  – относительное перемещение штока гидродомкрата, %.

При этом пренебрегаем переходным процессом, протекающим в самом датчике, из-за его быстротечности по сравнению с переходными процессами в других элементах САУ.

Приведем описание имитационных моделей элементов гидромеханической составляющей САУ перемещением стрелового ИО проходческого комбайна и осуществим расчет их параметров [2]. Гидравлическая часть силового гидрораспределителя (ГР) описывается передаточной функцией вида:

$$W_{\text{гидр.ГР}}(p) = \frac{K_{\text{ГР}}}{T_{\text{ГР}}^2 \cdot p^3 + 2 \cdot T_{\text{ГР}} \cdot \zeta \cdot p^2 + p} = \frac{\bar{L}_{\text{зол}}}{\bar{L}_{\text{як}}},$$

где  $L_{\text{зол}}$  – перемещение золотника силового гидрораспределителя, м;  $K_{\text{ГР}}$  – коэффициент усиления гидравлической части силового гидрораспределителя (19,3);  $T_{\text{ГР}}$  – постоянная времени гидравлической части силового ГР (0,019 с);  $\zeta$  – относительный коэффициент демпфирования колебаний гидравлической части ГР (0,607).

Модель механической части силового гидрораспределителя устанавливает связь между величиной перемещения золотника ГР (входная величина) и расходом жидкости на его рабочем входе (выходная величина). Модель представлена усилительным звеном с коэффициентом усиления:

$$K_{\text{зол}} = \frac{Q_{\text{ГР.max}}}{L_{\text{зол.max}}} = \frac{2,1 \cdot 10^{-3}}{0,022} = 0,095, \text{ м}^2/\text{с},$$

где  $Q_{\text{ГР.max}}$  – максимальный расход жидкости на рабочем входе ГР ( $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Гидродомкрат гидропривода перемещения ИО проходческого комбайна описывается передаточной функцией вида:

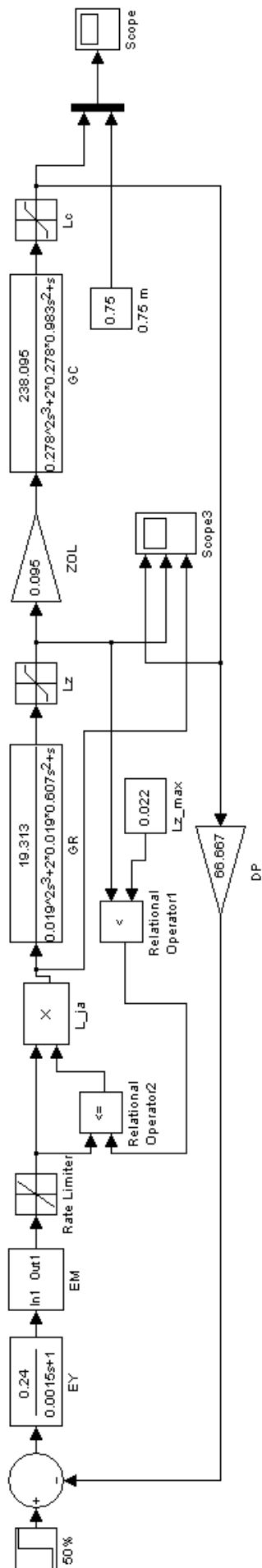
$$W_{\text{ГД}}(p) = \frac{K_{\text{ГД}}}{T_{\text{ГД}}^2 \cdot p^3 + 2 \cdot T_{\text{ГД}} \cdot \varepsilon \cdot p^2 + p} = \frac{\bar{L}_{\text{штм}}}{Q_{\text{ГР}}},$$

где  $Q_{\text{ГР}}$  – расход жидкости на рабочем входе ГР (входная величина данного элемента САУ),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $L_{\text{штм}}$  – перемещение штока гидродомкрата (выходная величина данного элемента САУ), м;  $T_{\text{ГД}}$  – постоянная времени гидродомкрата (0,278 с);  $\varepsilon$  – относительный коэффициент демпфирования колебаний гидродомкрата (0,983);  $K_{\text{ГД}}$  – коэффициент усиления гидродомкрата, который берется для статического режима:

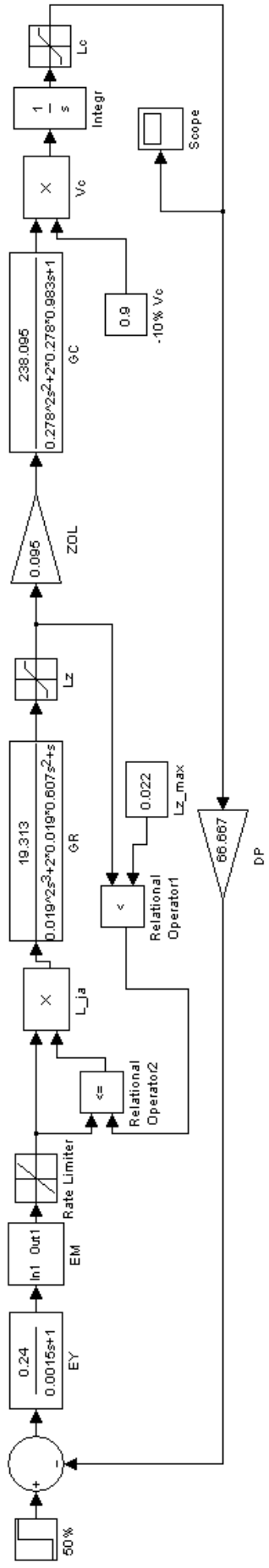
$$K_{\text{ГД}} = \frac{V_{\text{штм.max}}}{Q_{\text{ГР.max}}} = \frac{0,5}{2,1 \cdot 10^{-3}} = 238,1, \text{ м}^{-2},$$

где  $V_{\text{штм.max}}$  – максимальная скорость перемещения штока гидродомкрата при максимальном расходе жидкости на рабочем входе ГР (0,5 м/с).

На основе имитационных моделей элементов САУ и ее функциональной схемы, показанной на рис.3, реализуем имитационную модель САУ перемещением ИО проходческого комбайна с использованием дискретного электромагнита в составе пилотного ЭГР с помощью приложения Simulink математического пакета MatLab. Схема имитационной модели САУ показана на рис.3,а. В ней введена обратная связь по положению золотника ГР через дискретный датчик его конечного положения. С учетом особенностей преобразований сигналов внутри имитационной модели дискретный датчик конечного положения золотника реализован на основе блоков “Lz\_max”, “Relational Operator1”, “Relational Operator2” и “L\_ja”.



а



б

Рис. 3. Схема имитационной модели САУ перемещением ИО проходческого комбайна с применением трехпозиционно-го электромагнита: а – на холостом ходу; б – при разрушении горного массива

На основе разработанной имитационной модели САУ перемещением стрелового ИО проходческого комбайна получены переходные процессы, протекающие в системе автоматического управления при перемещении исполнительного органа с начального положения на половину хода, для случая, когда в составе пилотного электрогидрораспределителя применяется поляризованный трехпозиционный электромагнит.

Сделаем анализ переходных процессов, представленных на рис. 4. В момент изменения уставки в блоке “50 %” на выходе сумматора возникает рассогласование, что приводит к срабатыванию ЭМ и перемещению его якоря на 0,0051 м в крайнее правое положение, которое он достигает через 0,03 с. Отметим, что положительное направление оси ординат на рис.4, в соответствует перемещению якоря ЭМ в правую сторону.

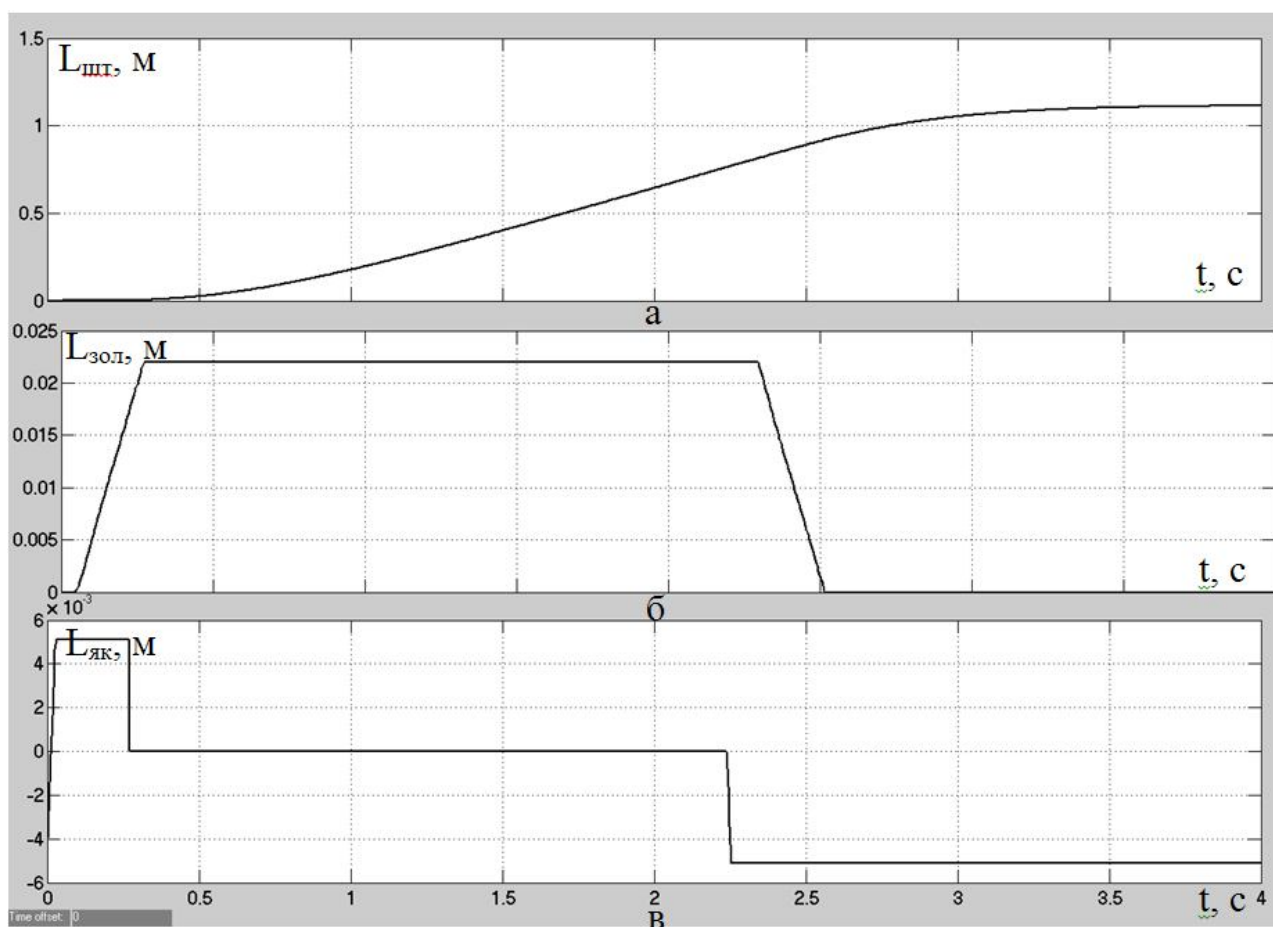


Рис. 4. Переходные процессы в САУ с трехпозиционным ЭМ: а – перемещения штока гидродомкрата привода ИО проходческого комбайна; б – перемещения золотника силового ГР; в – перемещения якоря ЭМ

Как следствие, золотник силового ГР тоже начинает перемещаться вправо, достигнув своего максимального хода 0,022 м за 0,27 с (рис.4,б). После этого срабатывает дискретный датчик конечного положения золотника, что приводит к обесточиванию обмоток ЭМ, и его якорь возвращается в нейтральное положение (рис.4, в). На управляющий вход ГР перестает поступать рабочая жидкость, и золотник фиксируется в неподвижном состоянии, которое соответствует его максимальному ходу (рис.4, б). Следовательно, начиная с 0,3 секунды,

наблюдается максимальный расход жидкости на входе гидродомкрата, благодаря чему уже на 1,25 с скорость перемещения его штока достигает максимального значения (рис.4, а).

На 2,24 с моделирования, когда шток ГД находится в заданном положении и его перемещение равно 0,75 м, срабатывает ЭМ и его якорь перемещается в крайнее левое положение (рис.4, в). Соответственно золотник ГР начинает перемещаться в обратную сторону и на 2,52 с достигает крайнего левого положения, полностью перекрыв нагнетательный трубопровод гидродомкрата. Однако, из-за механической инерционности перемещающегося ИО и движущихся частей гидропривода, а также из-за инерционности гидравлической части привода, шток продолжает перемещаться с замедлением еще 1,38 с, а затем останавливается на уровне 1,11 м. При этом относительная статическая ошибка на выходе САУ перемещением ИО проходческого комбайна составляет 48 %.

На рис. 4 рассмотрены переходные процессы в САУ перемещением исполнительного органа проходческого комбайна без контакта ИО с горным массивом (на холостом ходу). При разрушении горного массива создается осевое сопротивление перемещению ИО и, соответственно, движению штока гидродомкрата. Создание значительных сопротивлений перемещению штока ГД в процессе разрушения горного массива вызывает явление “просадки” гидропривода, когда при аналогичном давлении рабочей жидкости на поршень ГД его шток перемещается с меньшей скоростью. Это приводит к уменьшению коэффициента пропорциональности между расходом жидкости на входе силового ГР и перемещением штока ГД. То есть, изменяется один из параметров объекта управления – коэффициент усиления гидродомкрата.

С целью получения переходного процесса на выходе САУ перемещением ИО проходческого комбайна для случая присутствия сопротивления движению штока ГД, в имитационную модель гидродомкрата вводится переменная составляющая коэффициента усиления, который задает скорость перемещения штока (рис.3,б). При этом уменьшается на единицу порядок характеристического уравнения передаточной функции в блоке “GC”, чтобы его выходной величиной стала скорость перемещения штока ГД. Переменная составляющая коэффициента усиления задается в блоке “-10% Vc”. В нашем случае устанавливается снижение скорости перемещения штока ГД на 10% от номинальной, что соответствует максимально допустимой “просадке” гидропривода перемещения ИО проходческого комбайна.

Далее в блоке “Vc” переменная составляющая умножается на номинальный коэффициент усиления гидродомкрата и затем в блоке “Integr” скорость перемещения штока ГД интегрируется для получения величины перемещения штока. Таким образом, в измененной имитационной модели САУ перемещением ИО проходческого комбайна гидродомкрат задается не одним блоком, а четырьмя – “GC”, “-10% Vc”, “Vc” и “Integr” (рис.3, б).

На основании имитационной модели САУ перемещением ИО проходческого комбайна, представленной на рис.3,б, получим переходный процесс на выходе САУ для случая присутствия сопротивления движению штока ГД.

Из рис. 5 можно сделать вывод, что при максимальной “просадке” гидропривода ИО проходческого комбайна изменяется ход штока гидродомкрата с 1,11 м до 1,08 м. Следовательно, статическая ошибка на выходе САУ с трехпозиционным ЭМ чувствительна к изменениям сопротивления перемещению



штока ГД, что является еще одним недостатком применения трехпозиционного электромагнита в составе пилотного ЭГР.

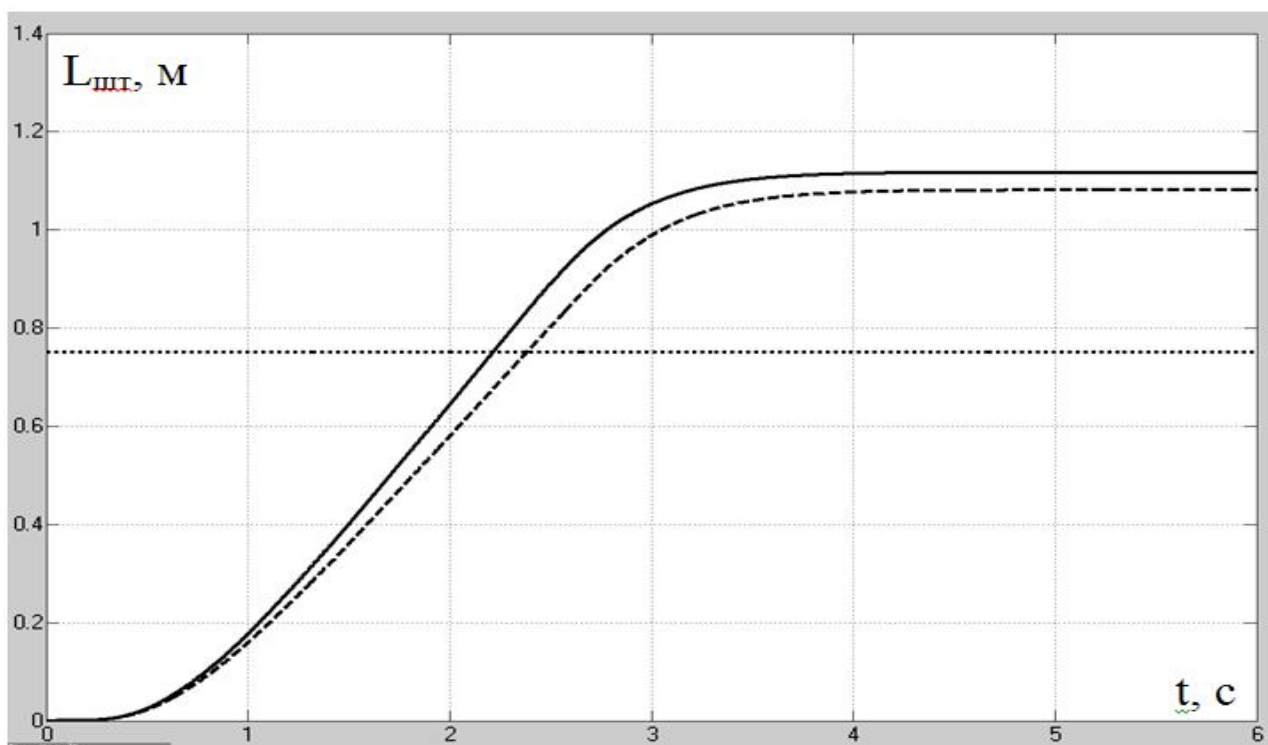


Рис. 5. Переходный процесс перемещения штока гидродомкрата привода ИО на выходе САУ с трехпозиционным ЭМ: сплошная линия – при отсутствии нагрузки на ИО; пунктирная – при наличии сопротивления движению штока ГД

**Выводы.** Отсюда можно сделать вывод, что переходный процесс на выходе САУ перемещением ИО проходческого комбайна с трехпозиционным ЭМ в составе пилотного ЭГР не удовлетворяет требованиям, которые установлены к точности позиционирования ИО. При автоматическом управлении перемещением ИО присутствует значительная ошибка по конечному положению органа, которая зависит от величины сопротивления движению штока ГД. Следовательно, необходима коррекция переходного процесса на выходе САУ, для эффективной реализации которой перемещение якоря электромагнита в составе пилотного ЭГР должно быть непрерывным.

#### Список литературы

1. Автоматизация технологических процессов подземных горных работ : учебник / А.В. Бубликов, М.В. Козарь, С.М. Проценко та ін. – Д. : Національний гірничий університет, 2012. – 320 с.
2. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. — 2-е изд., перераб. — М. : Машиностроение, 1982. — 423 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н.Ткачевим В.В.  
Надійшла до редакції 27.11.2014*