

2018 г.

## Оглавление

Введение .....	3
1. Кинематическая схема моделируемой системы .....	4
2. Компьютерная модель гидропривода .....	5
3. Подсистема нагрузки гидроцилиндра .....	8
4. Моделирование работы гидросистемы с различными параметрами .....	10
4.1. Управление работой гидропривода .....	10
4.2. Эксперименты с полным выдвижением штока .....	12
4.3. Эксперименты с неполным выдвижением штока .....	17
Заключение .....	19
Список использованной литературы .....	20
Приложение А .....	21
Приложение Б .....	26

## Введение

Силовой гидропривод применяется для решения множества разнообразных задач. Ряд из них связан со значительной ролью динамических нагрузок на рабочий орган в ходе выполнения гидроприводом требуемых технологических операций. К таким задачам относят, например, подъём грузов (например, использование гидроцилиндра для подъёма и выдвижения стрелы крана или гидромотора в лебёдке), горизонтирование транспортных платформ или подъём разводных пролётов мостов. Все эти операции, связанные с перемещением больших масс с переменной скоростью и в ограниченный промежуток времени, в большой степени зависят от сил инерции, связанных с ускорениями.

Учёт динамических нагрузок при работе силовых гидроприводов, вообще говоря, является довольно сложной задачей. В ряде случаев провести испытания в естественных условиях функционирования гидросистемы не представляется возможным. Метод компьютерного моделирования в такой ситуации является приемлемым выходом. Однако вопрос моделирования гидропривода даже в наиболее распространённых вычислительных пакетах (Matlab Simulink, Multisim и т. д.) как правило рассматривается в контексте описания вычислительных блоков или решения конкретных задач моделирования.

Предметом данной работы является учёт нагрузок и влияние различных динамических параметров на работу компьютерной модели силового гидропривода. Объектом работы является компьютерная модель гидросистемы подъёма стрелы крана. Цель работы – изучение работы компьютерной модели при различных сочетаниях статических и динамических нагрузочных параметров в условиях переменной нагрузки. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- Исследование моделирования статической и динамической переменной нагрузки.
- Изучение механических параметров нагрузки.
- Измерение и запись результатов работы модели – изменений параметров механической и гидравлической подсистемы.

## 1. Кинематическая схема моделируемой системы

На рисунке 1 представлена кинематическая схема работы гидравлического подъёмника стрелы крана в начальном положении (а) и положении максимального подъёма стрелы (б).

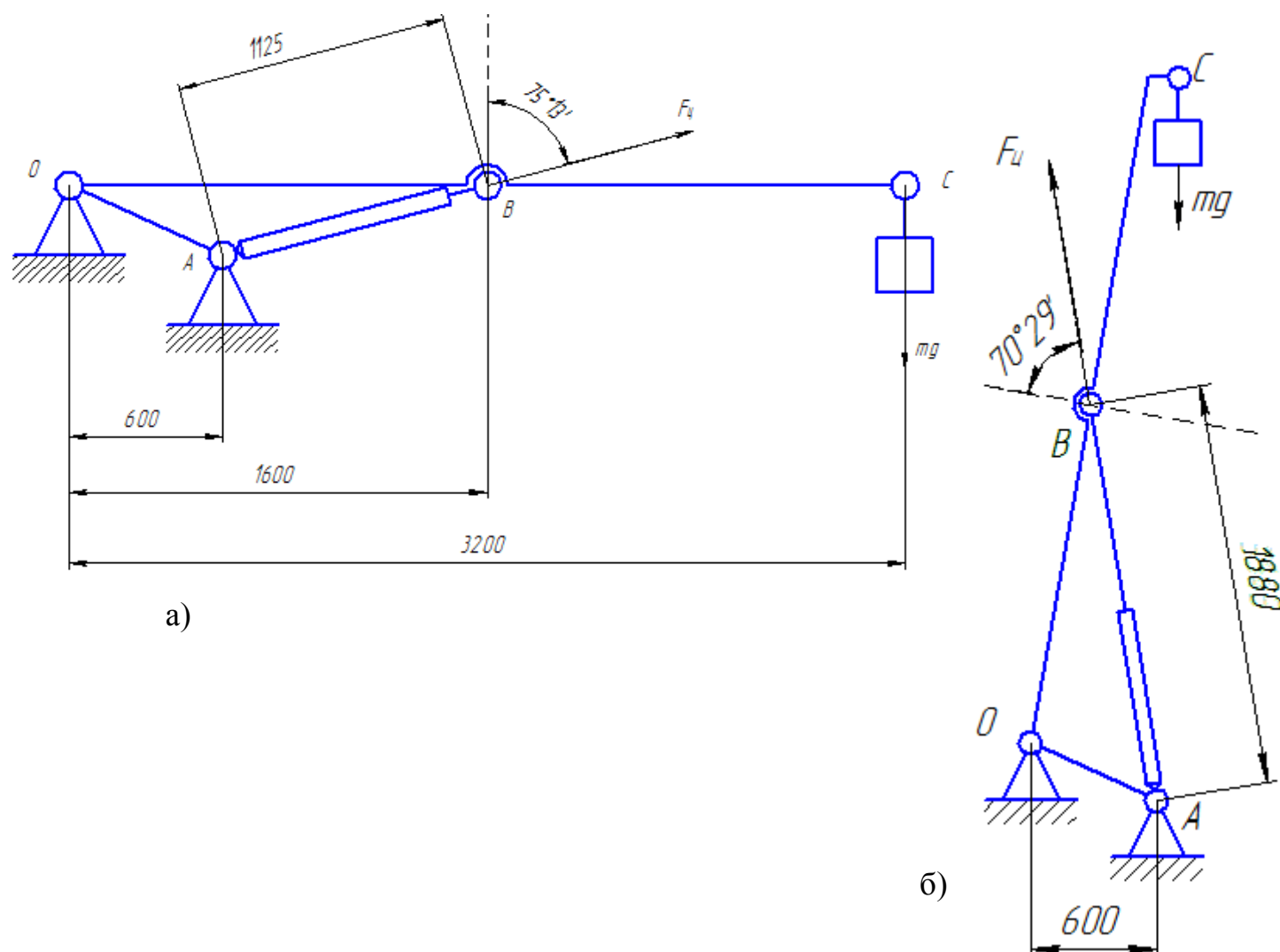


Рисунок 1 – Упрощённая кинематическая схема крана

Как видно из рисунка, аксиальная нагрузка на шток цилиндра в разные моменты времени непостоянна и зависит от степени выдвижения штока. Кроме того, переменная динамическая нагрузка на шток, возникающая вследствие ускорения поднимаемой массы в моменты разгона и торможения привода.

## 2. Компьютерная модель гидропривода

В соответствии с задачами выдвижения стрелы крана, разработана гидравлическая схема силового гидропривода, предназначенного для её реализации. Моделирование гидравлической системы в пакете Simulink Hydraulics представляет собой графический выбор моделей различных устройств, параметров привода и рабочей жидкости. Модель гидравлической схемы разрабатываемого привода представлена на рисунке 2.

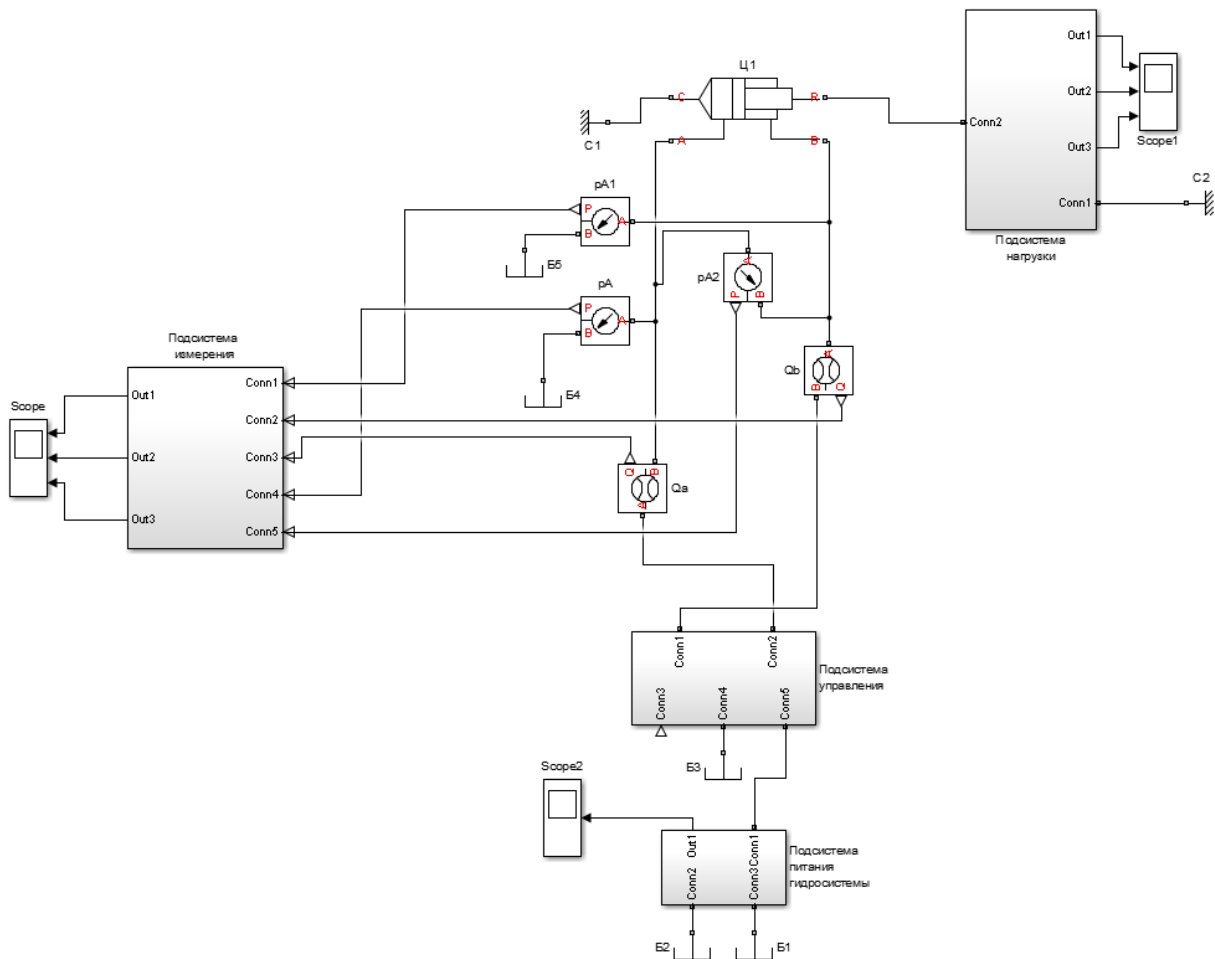


Рисунок 2 – Компьютерная модель гидропривода

В данной модели для удобства визуального восприятия отдельные подсистемы гидропривода объединены в блоки с соответствующими наименованиями. На данном этапе моделирования гидравлического привода приняты следующие допущения:

- не моделируются потери напора по длине трубопроводов и местные гидравлические сопротивления;
- отсутствует трение в цилиндре, насосе и золотнике, силы инерции поршня и штока цилиндра;

- отсутствуют утечки и перетечки в гидросистеме.

Гидравлический привод подъёма стрелы крана, представленный на рисунке 2, состоит из следующих базовых подсистем:

- подсистема питания гидросистемы: нерегулируемый гидронасос ГН1 с моделью приводного двигателя ЭД, предохранительного клапана КН1, бака Б1 и свойств рабочей жидкости СЖ1;
- подсистема управления: золотниковый гидрораспределитель 4/3 Р1 с электромагнитным управлением КР1;
- гидроцилиндр Ц1;
- подсистема модели нагрузки;
- вспомогательные и измерительные системы моделирования Matlab Simulink (в рамках всех подсистем).

Нерегулируемый гидравлический насос ГН1 под действием электродвигателя ЭД, представленного моделью идеального источника угловой скорости, осуществляет подачу жидкости из Б1 в систему. Свойства рабочей жидкости представлены моделью задания свойств СЖ1. При превышении давлением в системе установленной при помощи модели предохранительного клапана КН1 величины начинается расход через клапан. Величина расхода измеряется расходомером Qb1 и направляется в модель осциллографа Scope2. Рабочая жидкость, подаваемая в систему насосом, поступает на четырёхлинейный трёхпозиционный гидрораспределитель Р1, обеспечивающий в нейтральном положении слив рабочей жидкости обратно в гидробак. При падении управляющего электрического сигнала на актуатор распределителя КР1 золотник смещается, схема распределителя принимает левое положение, начинается подача рабочей жидкости в поршневую полость гидроцилиндра Ц1. Из штоковой полости осуществляется слив рабочей жидкости в бак. Гидроцилиндр нагружен переменной силой, зависящей от хода штока. В линиях А и В, сообщающихся с поршневой и штоковой полостями гидроцилиндра соответственно, осуществляется измерение расхода и давления относительно бака. Также осуществляется измерение хода штока, его скорости и силы на штоке.

В таблице 1 представлены параметры гидравлических устройств, используемых при моделировании. Стоит отметить, что задача подбора и расчёта конкретных устройств не является предметом данной работы; в рамках работы они являются известными или заданными.

Таблица 1 – Параметры гидравлических устройств модели

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Диаметр поршня	мм	200
Диаметр штока	мм	125
Площадь поршня	м <sup>2</sup>	0.0314
Разница площадей поршня и штока	м <sup>2</sup>	0.019
Объём поршневой полости начальный	м <sup>3</sup>	0.0471
Объём штоковой полости начальный	м <sup>3</sup>	0.0285
Ход штока	мм	1000
Угловая скорость приводного двигателя	рад/с	314
Номинальная подача насоса	л/мин	200
Рабочий объём насоса	см <sup>3</sup> /рад	11
Настройка предохранительного клапана	МПа	25
Нагрузка на штоке цилиндр	кН	200 - 500

В следующих разделах более подробно будет рассмотрена подсистема задания нагрузки на шток гидроцилиндра и проведено моделирование работы полученной системы в двух режимах: полного и неполного выдвижения штока.

### 3. Подсистема нагрузки гидроцилиндра

Важнейшим аспектом моделирования силового гидропривода является правильное задание нагрузки на исполнительный механизм. Существует несколько моделей линейной поступательной механической нагрузки в Simulink Hydraulics:

- Статическая нагрузка или идеальный источник силы – блок Ideal Force Source, на вход которого подаётся информационный сигнал Simulink. Блок осуществляет моделирование исключительно статической нагрузки, действующей всё время моделирования и изменяющейся по заданному пользователем закону.

- Динамическая нагрузка или модель массы – блок Mass, не имеющий информационных портов. Величина массы задаётся пользователем в окне блока. Блок осуществляет моделирование исключительно динамической нагрузки, то есть, усилие на штоке возникает лишь во время ускорения и определяется формулой:

$$F = -m * a^2 \quad (1)$$

- Упругая статическая нагрузка (переменная) – блок Translational Spring, представляющий собой идеальную пружину. Усилие, возникающее на штоке, пропорционально перемещению штока. Коэффициент пропорциональности выбирается пользователем, при значениях, близких к 0, данный блок фактически моделирует свободное перемещение штока.

- Упругая статическая нагрузка, зависящая от скорости – блок Translational Damper, представляющий собой идеальный демпфер. Усилие, возникающее на штоке, пропорционально изменению скорости штока. Коэффициент пропорциональности выбирается пользователем, при значениях, близких к 0, данный блок также моделирует свободное перемещение штока.

На рисунке 3 представлена подсистема нагрузки гидроцилиндра. Методика моделирования нагрузки следующая. В качестве коэффициентов пропорциональности для пружины Пр1 и демпфера Д1 задаются поначалу небольшие числа:

$$k1 = 1 \text{ Н/м}, \quad k2 = 100 \text{ Н/(м/с)}.$$

Таким образом влияние пружины и демпфера на нагрузку штока с его выдвиганием минимизируется. На блок статической нагрузки подаётся разница сигнал, описываемый уравнением:

$$F = C - k * s \quad (2)$$



где  $C$  – заданная в начальный момент времени нагрузка,  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $s$  – ход штока в метрах. Таким образом моделируется переменная нагрузка при подъёме гидроцилиндром стрелы крана. Значение массы  $m$  задаётся усреднённое по периоду подъёма. Ход штока, скорость штока и усилие, создаваемое штоком измеряются посредством датчиков движения ДД и силы ДС.

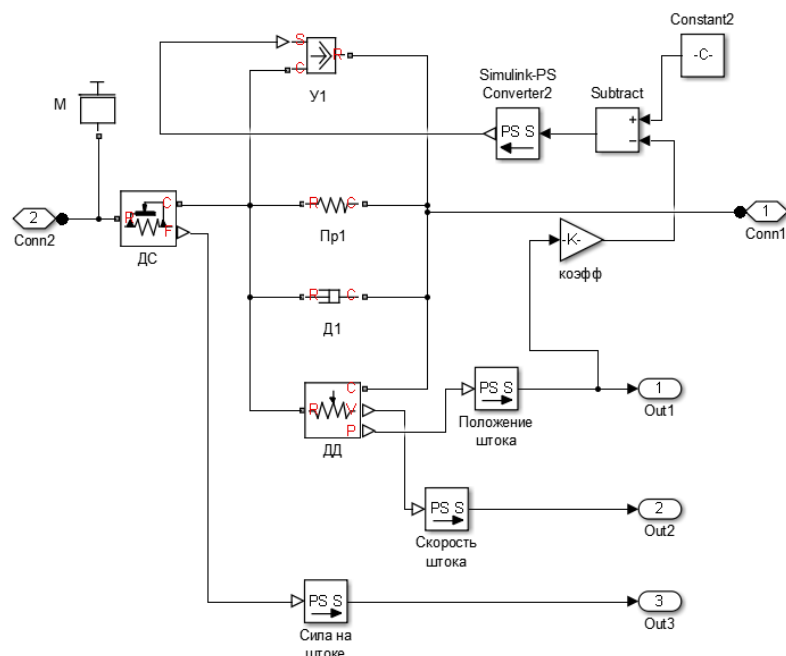


Рисунок 3 – Подсистема нагрузки гидроцилиндра

Уравнение (2) не отражает точного соотношения между величиной выдвижения штока гидроцилиндра и величиной силы, действующей на этот шток. Однако выраженная математическая формула, вообще говоря, может быть любой, в зависимости от результатов точного расчёта влияния хода штока на нагрузку.

## 4. Моделирование работы гидросистемы с различными параметрами

### 4.1. Управление работой гидропривода

На рисунке 4 изображена подсистема управления распределителем гидропривода.

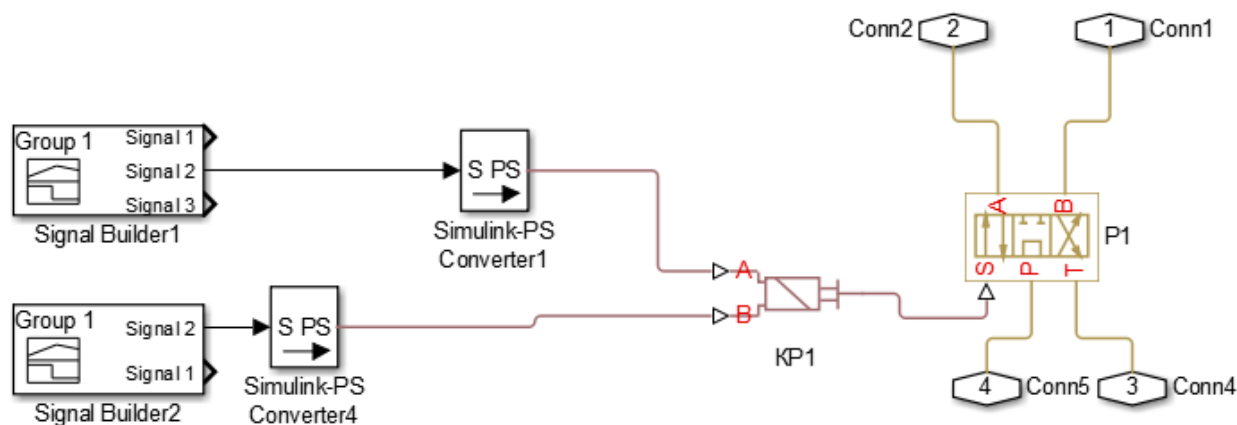


Рисунок 4 – Система управления распределителем

В качестве управляющего элемента используется электромагнитный актуатор с двумя управляющими каналами:

- положительный сигнал на канале А приводит к смещению золотника вправо и открытию каналов Р-А и В-Т в распределителе;
- положительный сигнал на канале В приводит к смещению золотника влева и открытию каналов А-Т и Р-В.
- золотник распределителя начинает смещаться по достижении управляющим сигналом половины своей номинальной величины;
- в модели актуатора имеется возможность устанавливать время переходного периода, величину хода актуатора и ряд других параметров.

На рисунке 5 представлено окно настройки блока двунаправленного актуатора гидрораспределителя. На рисунке 6 (а, б) представлены задающие воздействия на электромагниты актуатора, соответствующие двум выбранным режимам тестирования модели – режиму полного выдвижения штока и режиму частичного выдвижения штока. С учётом данных таблицы 1, полное выдвижение штока осуществляется за 11,5 секунд.

Settings

Parameters

Push-pin stroke:	0.005	m
Switching-on time:	1	s
Switching-off time:	1	s
Nominal signal value:	24	
Initial position:	Neutral	

Рисунок 5 – Параметры двунаправленного актуатора гидрораспределителя

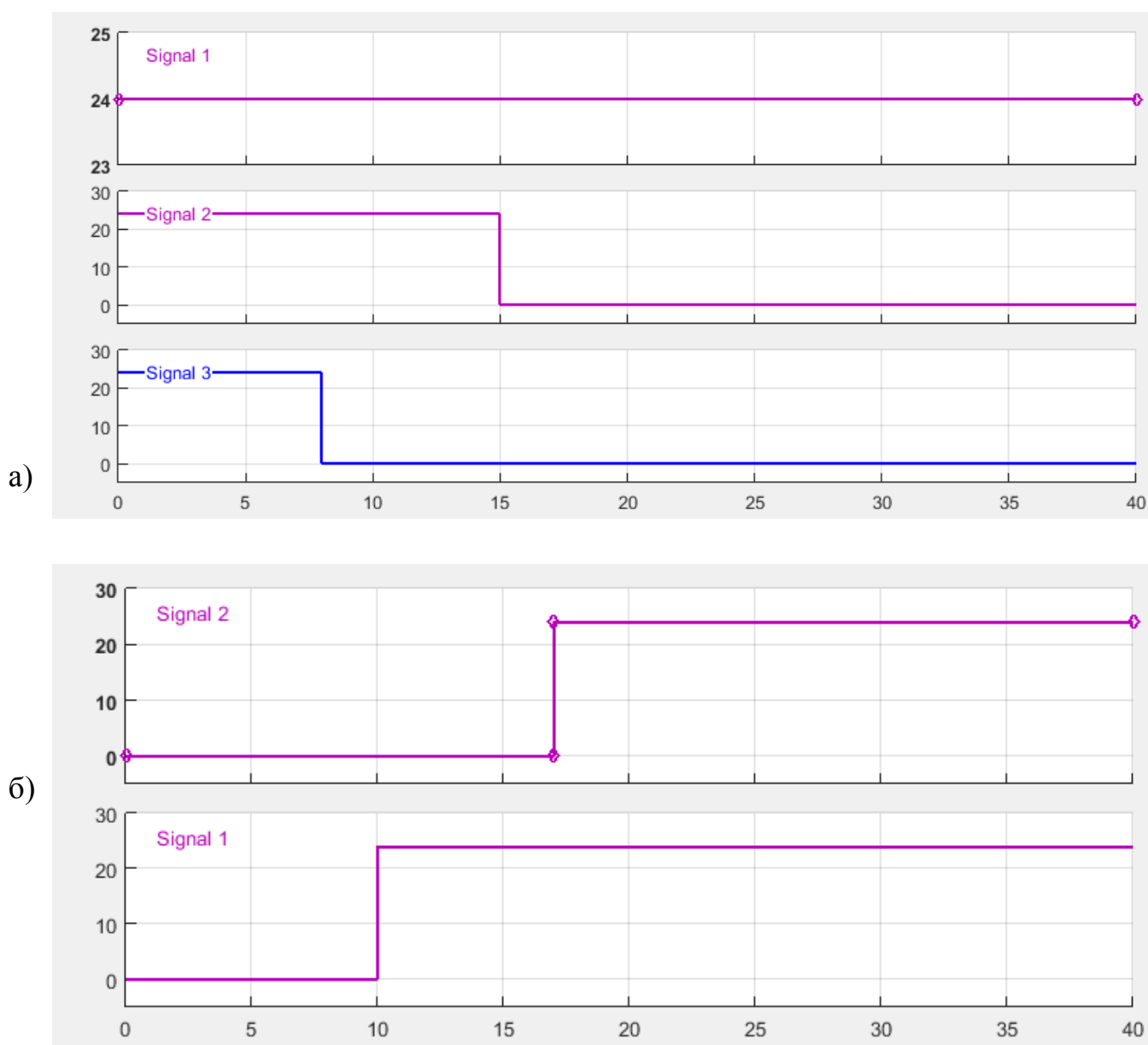


Рисунок 6 – Окно настройки задающих воздействий управляющего элемента гидрораспределителя

## 4.2. Эксперименты с полным выдвижением штока

В ходе работы была смоделирована работа упрощённой модели гидропривода подъёма стрелы крана. Как отмечалось выше, упрощения, в основном, коснулись потерь давления рабочей жидкости на трубопроводе и местных сопротивлений. Кроме того, в полученной модели отсутствуют утечки и перетечки, а ряд свойств жидкости зафиксирован, и их влияние на работу системы в данной работе не исследуется. Кроме того, построенная гидравлическая схема подразумевает отсутствие таких элементов, как гидрозамок и тормозной клапан, что также является значительным упрощением работоспособной схемы.

Параметры устройств гидроаппаратуры соответствуют рассмотренным.

$$F = C - k \cdot s$$

$$s_{\max} = 1 \text{ м} - \text{ход штока.}$$

$m$  – масса (динамическая составляющая нагрузки).

В таблице 2 представлен перечень измеряемых в ходе опыта величин – гидравлических и механических.

Таблица 2 – Перечень измеряемых величин

Измеряемая величина	Единица измерения	Осциллограф
Давление в линии А	МПа	Scope
Давление в линии В	МПа	Scope
Давление между линиями А и В	МПа	Scope
Расход в линии А	л/мин	Scope
Расход в линии В	л/мин	Scope
Расход через предохранительный клапан	л/мин	Scope2
Ход штока	м	Scope1
Скорость штока	м/с	Scope1
Усилие на штоке	Н	Scope1

Условия базового опыта принимаются следующими:

- Коэффициенты жёсткости пружины и демпфера  $k_{\text{пр}} = 1$ ,  $k_{\text{д}} = 100$ .
- Начальное усилие на штоке  $C = 500 \text{ кН}$ , что соответствует массе 50 тонн.
- Коэффициент  $k = 200\,000$ , как следствие, к моменту полного выдвижения штока усилие составит 300 кН, что соответствует массе 30 тонн.

- В силу отсутствия возможности установить значения блока массы переменным, в базовом опыте масса устанавливается равной  $m = 30\,000$  кг.

- Начальное давление в поршневой полости гидроцилиндра принимается равным  $p_{шт0} = 0$  МПа.

На рисунке 7 представлены результаты базового опыта – графики изменения гидравлических (а) и механических (б) параметров.

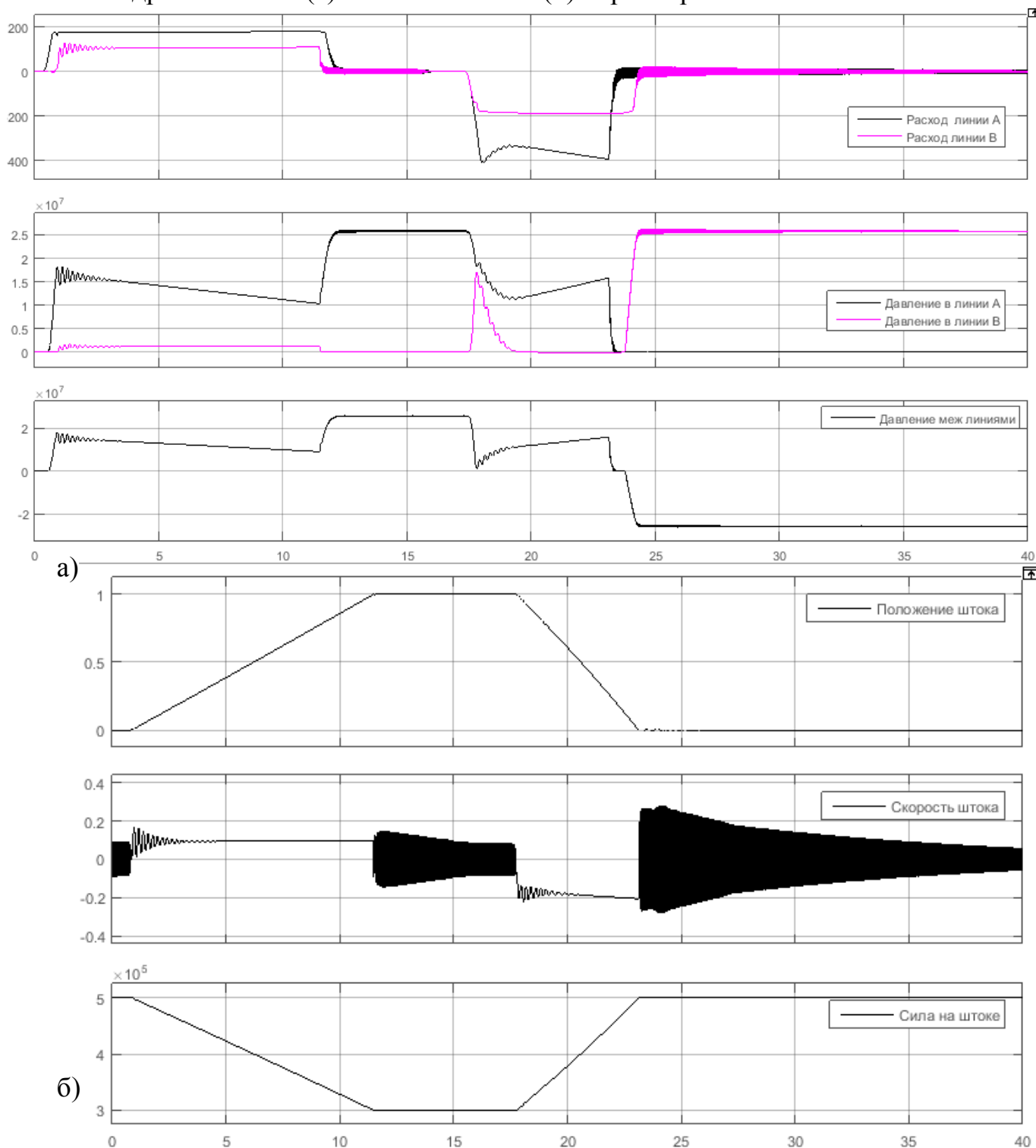


Рисунок 7 – Результаты базового опыта

По результатам опыта можно сделать выводы о соответствии графиков гидравлических и механических величин ожидаемым согласно теоретическим расчётам:

- Время задвигание штока заметно меньше времени задвигания, что соответствует поведению одноштокового гидроцилиндра при постоянном расходе.

- Усилие на штоке меняется в соответствии заданной статической нагрузкой, равно как и давление в линиях А и В.

- Из-за наличия динамической нагрузки переходные процессы приобретают колебательный характер, что хорошо заметно на графиках скорости штока и гидравлических параметров.

Дальнейшие опыты направлены на оценку влияния различных параметров на результат моделирования. В таблице 3 представлен перечень исходных данных опытов при различной нагрузке гидроцилиндра и указанных параметрах прочих элементов гидросистемы. Помимо задаваемой массы и параметров статической нагрузки в разных опытах меняется так же начальное давление поршневой полости гидроцилиндра. В ряде опытов в качестве начального давления в поршневой полости гидроцилиндра устанавливается величина, соответствующая статическому удержанию груза, вес которого равен начальному усилию на штоке гидроцилиндра.

Таблица 3 – Перечень параметров для экспериментов

№ опыта	C, Н	k, Н/м	m, кг	k <sub>пр</sub> , Н/м	k <sub>д</sub> , Н/(м/с)	P <sub>шт0</sub> , МПа
1	500 000	200 000	1 000	1	100	0
2	500 000	200 000	30 000	1000	10 000	0
3	500 000	200 000	30 000	200 000	100	0
4	500 000	200 000	10 000	1	100	15
5	500 000	450 000	10 000	1	100	0
6	50 000	20 000	1 000	1	100	0

Результаты экспериментов представлены в Приложении А (А1 – А6).

#### Опыт №1.

В рамках данного опыта изучается влияние динамических параметров системы (модель присоединённой массы, проявляющаяся лишь в моменты наличия ускорения). По графику приложения А1 видно, что с уменьшением присоединённой динамической массы с 30 тонн до 1 тонны значительно

уменьшились колебания при переходном процессе. Вместе с тем очевидно, что в реальных системах подобное уменьшение невозможно при заданных параметрах статической нагрузки.

#### Опыт №2.

В данном опыте изучается влияние коэффициентов жёсткости и демпфирования, описывающих колебательные свойства присоединённой нагрузки, на работу гидросистемы. В ходе опыта данные коэффициенты увеличиваются в 1000 раз. Одновременно возвращается значение массы 30 тонн, присвоенное в базовом опыте. На основании анализа результатов эксперимента (график А2), можно заключить, что значительных отличий от базового опыта не зафиксировано. Изменение коэффициентов слишком мало, чтобы повлиять на результат.

#### Опыт №3.

В данном опыте коэффициент жёсткости пружины, моделирующей колебательные свойства механической нагрузки, был значительно увеличен – до значения 200 кН, соответствующего коэффициенту пропорциональности в статической нагрузке. Таким образом, усилие на штоке гидроцилиндра в данном опыте составило:

$$F = C - k \cdot s + k_{\text{пр}} s = C,$$

так как  $k = k_{\text{пр}}$ .

Результатом данного опыта (А3) стало практически постоянное (до момента полного выдвижения штока) давление между полостями. Усилие на штоке также колеблется около постоянной отметки  $C = 500$  кН.

#### Опыт №4.

Данный опыт исследует моделирование начального давления в поршневой полости гидроцилиндра. Величина давления принимается равной 15 МПа. В этом случае (А4) моделирование показывает практически полное отсутствие расхода и, как следствие, движения штока. Отсюда можно сделать вывод: при моделировании работы гидроцилиндра начальное давление в поршневой полости, соответствующее массе штока с грузом, моделируется автоматически.

#### Опыт №5.

В данном опыте моделируется практически полная разгрузка штока (90%) в ходе его выдвижения. Характер графиков по результатам опыта (А5) соответствует результатам базового опыта, однако интервалы изменения давления и силы на штоке больше вследствие большего интервала задающего усилия.

### Опыт №6.

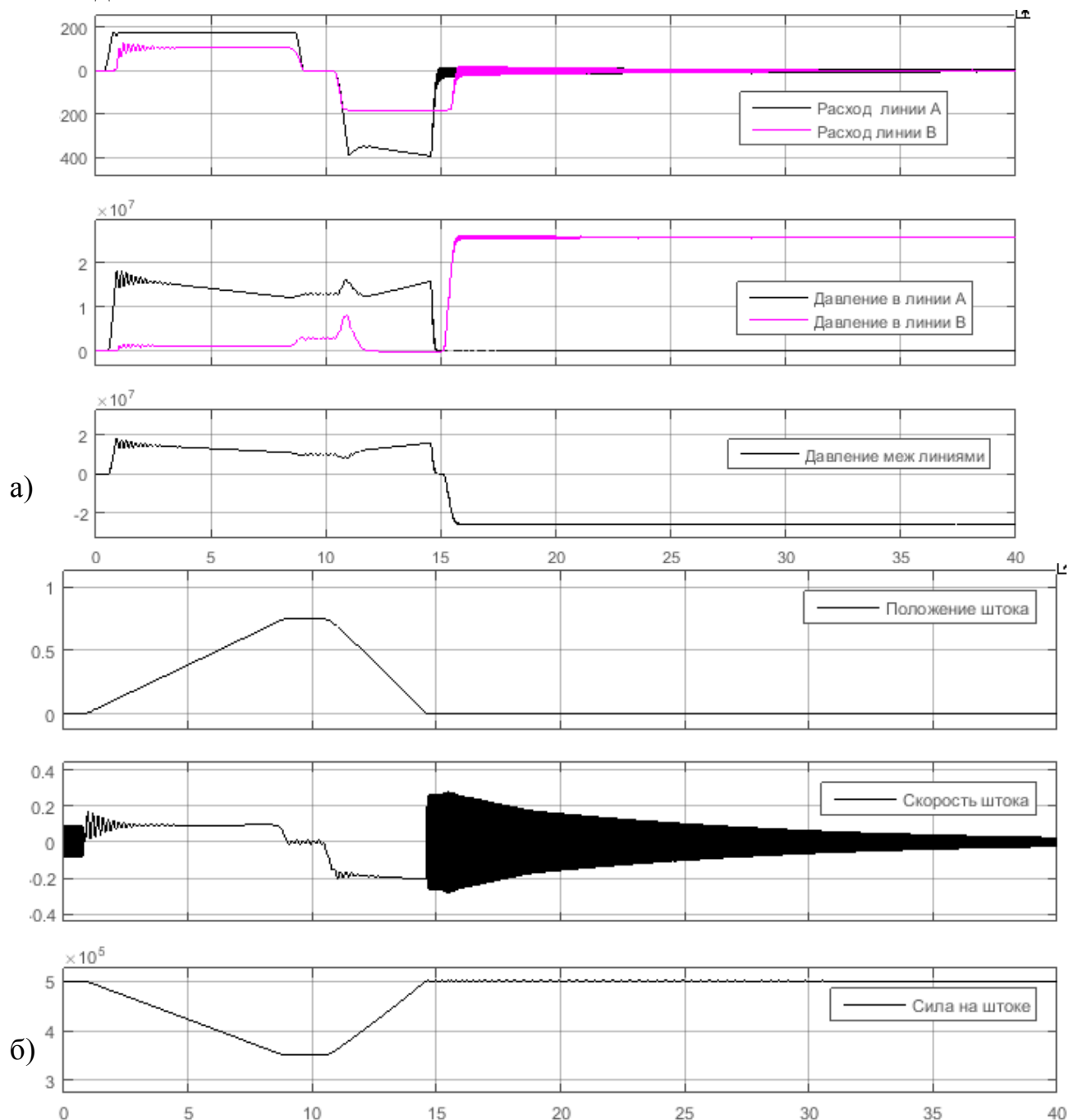
В ходе данного опыта изучается фактически масштабирование базового опыта. Абсолютная величина усилия на штоке гидроцилиндра в каждый момент времени в 10 раз меньше, чем в базовом опыте. Таковы же и результаты опыта (А6), однако вследствие малости усилия давления в поршневой полости гидроцилиндра и в линии А соответственно вплотную приближено к постоянному давлению в линии В, вызванному сопротивлением канала. Вследствие этого давление между линиями близко к нулевому.



### 4.3. Эксперименты с неполным выдвижением штока

В данной серии экспериментов параметры системы сохранены соответствующими рассмотренным в 4.2, за исключением времени переключения распределителя. В данной серии переключение распределителя происходит до момента полного выдвижения штока, через 8 секунд после начала работы привода.

На рисунке 8 представлены результаты базового опыта – графики изменения гидравлических (а) и механических (б) параметров системы в режиме неполного выдвижения штока.



Результаты базового опыта во втором режиме повторяют результаты базового опыта в первом, с предсказанными отличиями:

- Уровень давления не достигает давления настройки из-за ограничения выдвижения штока 0,8 м.

- Все изменения гидравлических и механических параметров происходят за меньший промежуток времени, что объясняется более ранним переключением распределителя.

Дальнейшие опыты направлены на оценку влияния различных параметров на результат моделирования. В таблице 4 представлен перечень исходных данных опытов при различной нагрузке гидроцилиндра и указанных параметрах прочих элементов гидросистемы.

Таблица 4 – Перечень параметров для экспериментов в режиме неполного выдвижения штока

№ опыта	C, Н	k, Н/м	m, кг	k <sub>пр</sub> , Н/м	k <sub>д</sub> , Н/(м/с)	P <sub>шт0</sub> , МПа
1	500 000	200 000	1 000	1	100	0
2	500 000	200 000	30 000	1000	10 000	0
3	500 000	200 000	30 000	200 000	100	0
4	500 000	200 000	10 000	1	100	15
5	500 000	450 000	10 000	1	100	0
6	50 000	20 000	1 000	1	100	0

Результаты экспериментов представлены в Приложении Б. Условия всех опытов, равно как и исследуемые величины, аналогичны таковым в первой серии опытов. Результаты также идентичны результатам первой серии опытов с тем исключением, что давление настройки предохранительного клапана (25 МПа) в этих опытах не достигается при выдвижении штока, так как шток выдвигается не полностью.

## Заключение

В ходе данной работы изучено функционирование компьютерной модели силового гидропривода стрелы крана при различных сочетаниях статических и динамических нагрузочных параметров в условиях переменной нагрузки. Модель силового гидропривода, составленная для реализации подъёма стрелы крана, представленной на кинематической схеме рисунка 1, характеризуется некоторой идеализацией. В частности, отсутствуют необходимые в таких схемах тормозные клапаны и гидрозамки. Кроме того, не учитываются потери давления на длине трубопровода и на местных сопротивлениях, не рассматривается влияние некоторых свойств жидкости на работу привода.

Построена базовая модель привода, на основе которой проведён базовый эксперимент с набором параметров, принимаемых за начальные, соответствующие кинематической схеме рассматриваемого подъёмника. При реализации модели нагрузки для учёта статической и динамической её составляющей были использованы блоки статической силы (статическая составляющая) и массы (динамическая составляющая). Для имитации переменной нагрузки использованы математические блоки Simulink, участвующие в выработке сигнала на блок статической силы. Переменную динамическую нагрузку силами данного пакета смоделировать не удалось. В таких задачах требуется прибегать к построению отдельной модели SimMechanics.

Результаты моделирования соответствуют теоретически предсказанным в обоих базовых опытах – в режиме полного и неполного выдвижения штока. В дальнейших опытах исследовалось влияние различных параметров нагрузки на функционирование модели и результаты моделирования. Все результаты соответствуют теоретически предсказанным. В частности:

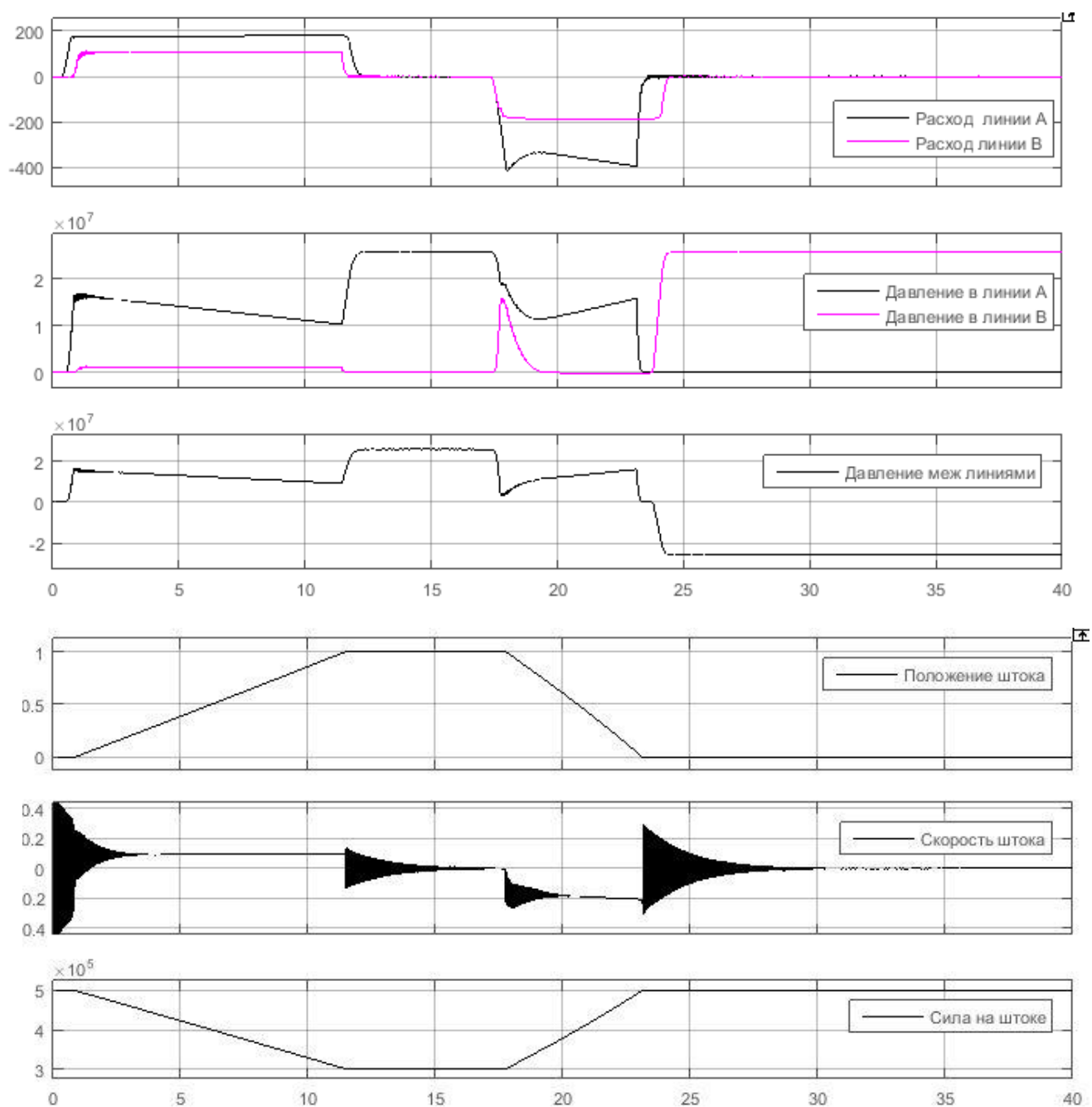
- С увеличением динамической составляющей нагрузки (блока массы) увеличивается амплитуда колебаний давления, расхода и скорости движения штока при переходных процессах.
- При уменьшении абсолютной величины нагрузки на шток в какой-то момент давление в напорной линии становится практически равным давлению в сливной линии.
- При увеличении диапазона изменения усилия в зависимости от хода штока пропорционально увеличивается и диапазон изменения параметров привода.
- Коэффициент жёсткости пружины игрант значительную роль при моделировании при величине примерно того же порядка, что и величина нагрузки.

## Список использованной литературы

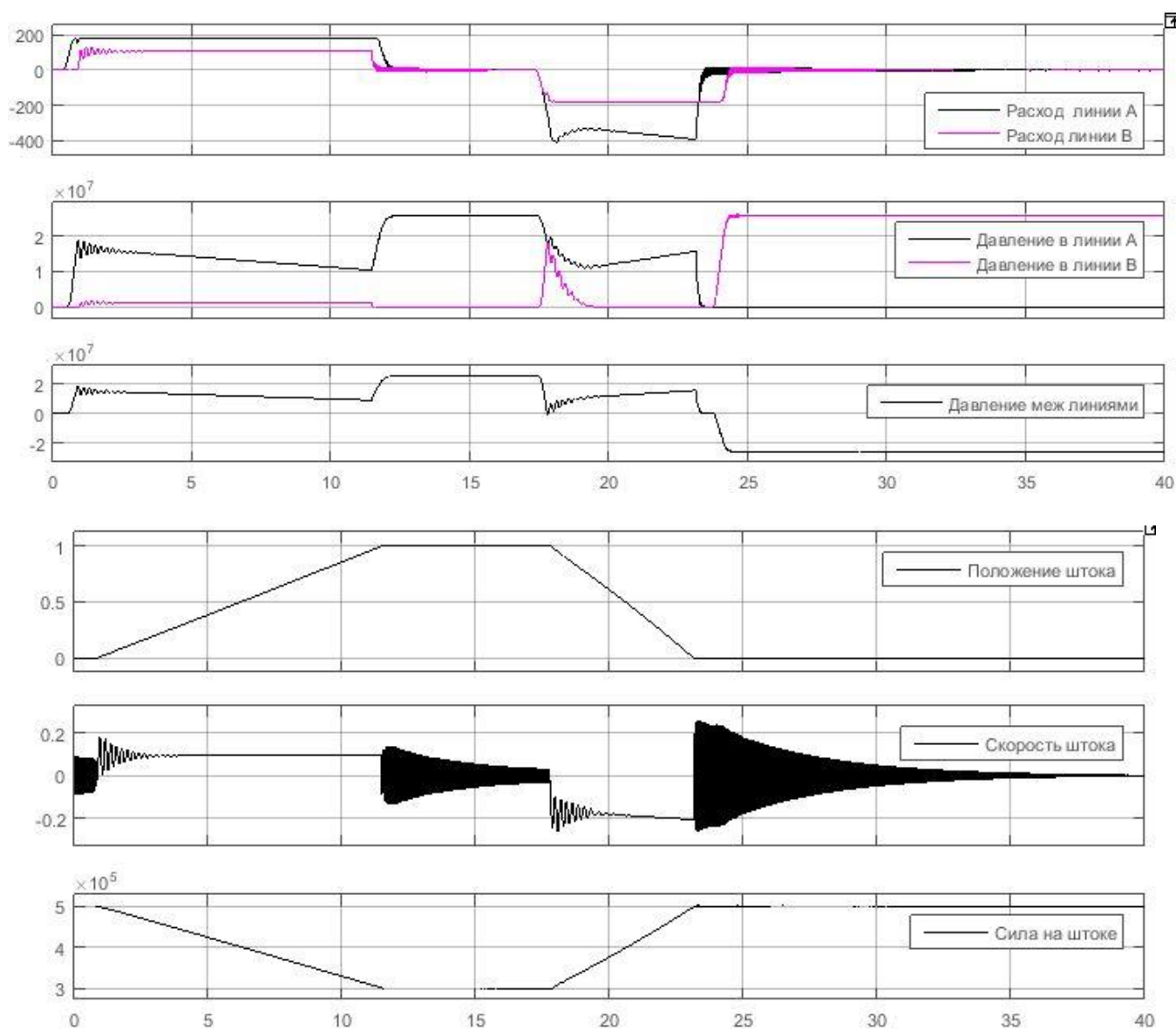
1. Башта, Т. М., Руднев, С. С., Некрасов, Б. Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т. М. Башта и др. – М.: Альянс, 2010. – 423 с.
2. Васильченко, В. А. Гидравлическое оборудование мобильных машин: Справочник / В. А. Васильченко. – М.: Машиностроение, 1983. – 301 с.
3. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: Учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.
4. Руппель, А. А., Сагандыков, А. А., Кoryтов, М. С. Моделирование гидравлических систем в Matlab: учебное пособие / А. А. Руппель и др. – Омск: СиБАДИ, 2009. – 172 с.
5. Simscape Fluids. Официальный сайт Matlab в России. Система помощи. – URL: <https://matlab.ru/products/simhydraulics/> (дата обращения: 27.08.2018).

## Приложение А

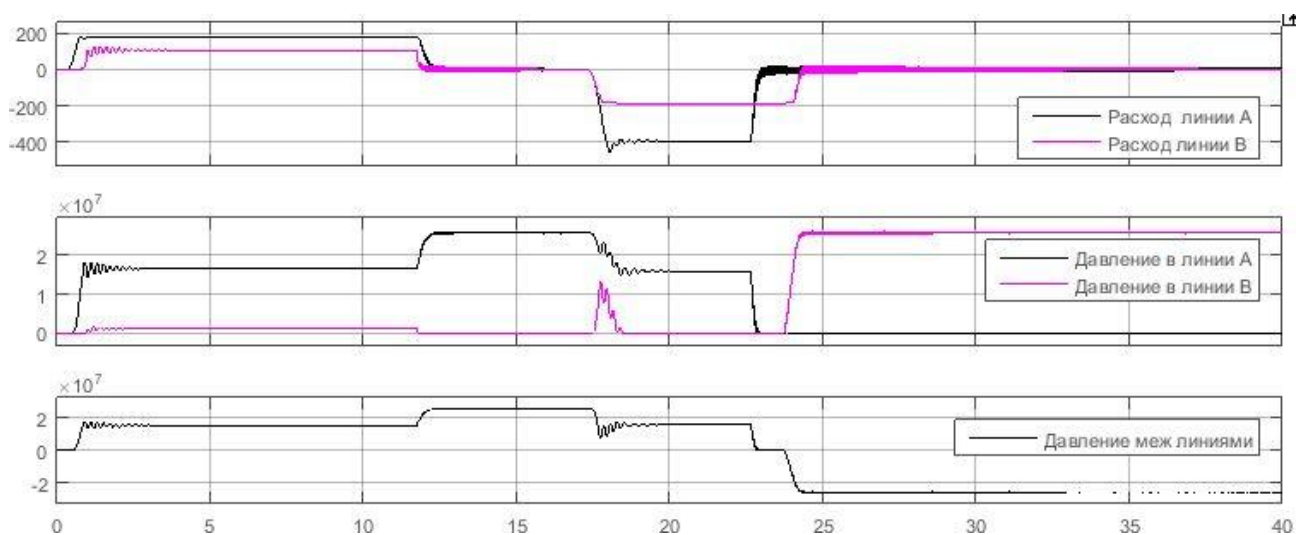
### А1 – Результаты опыта 1

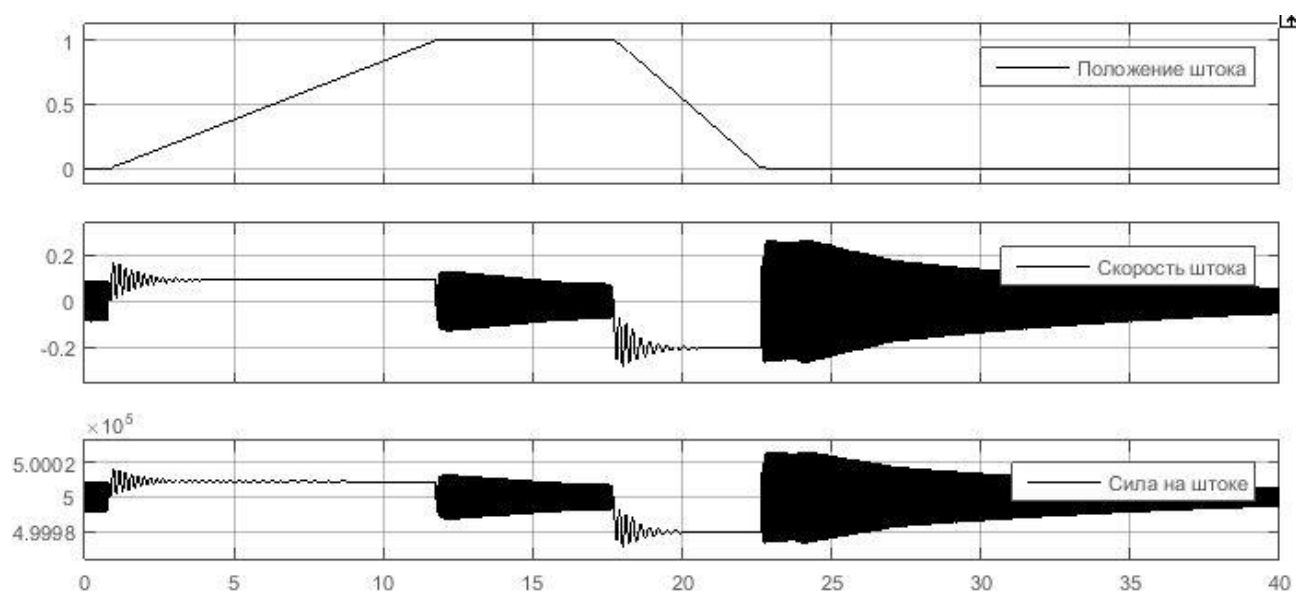


## А2 – Результаты опыта 2

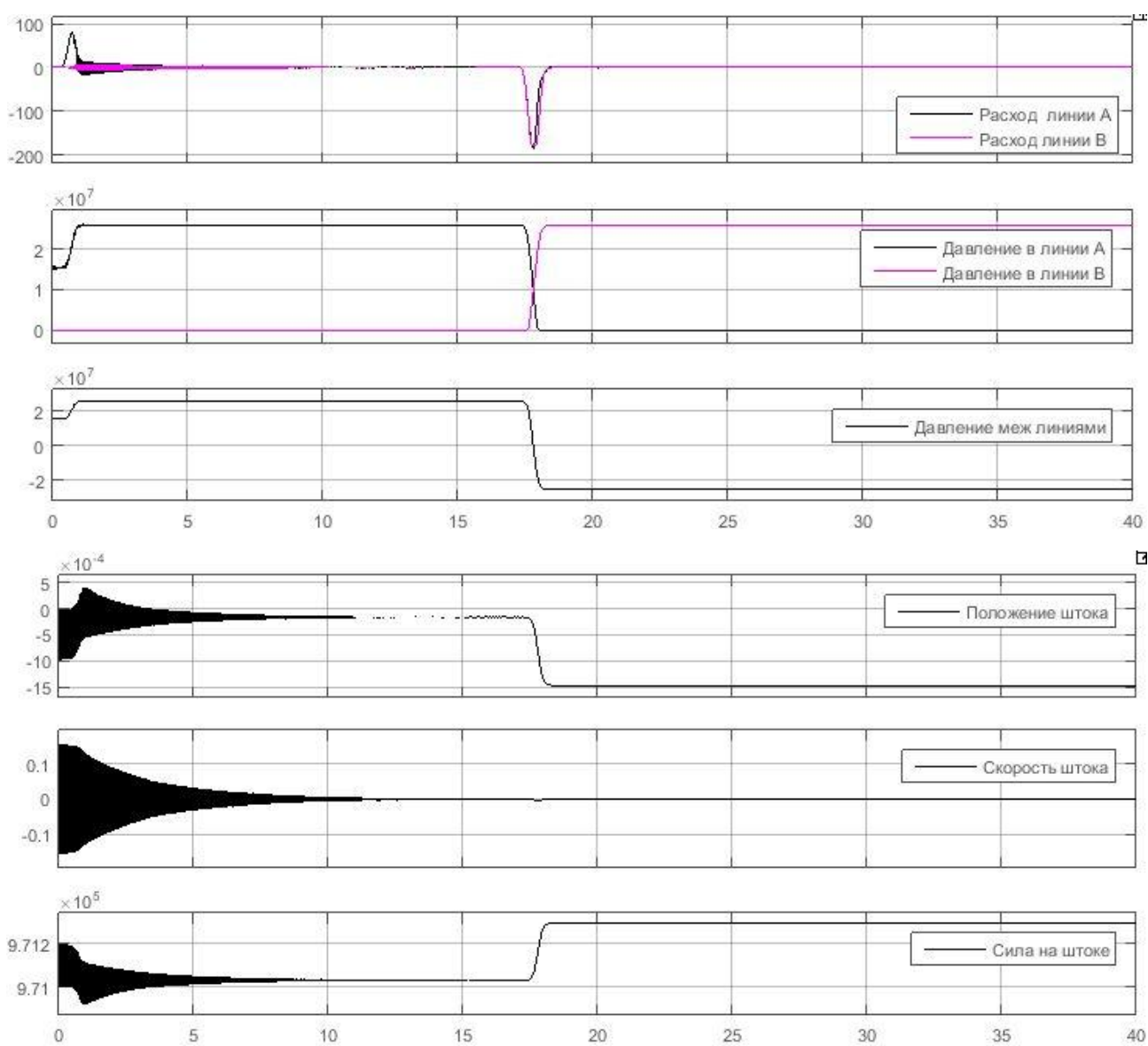


## А3 – Результаты опыта 3

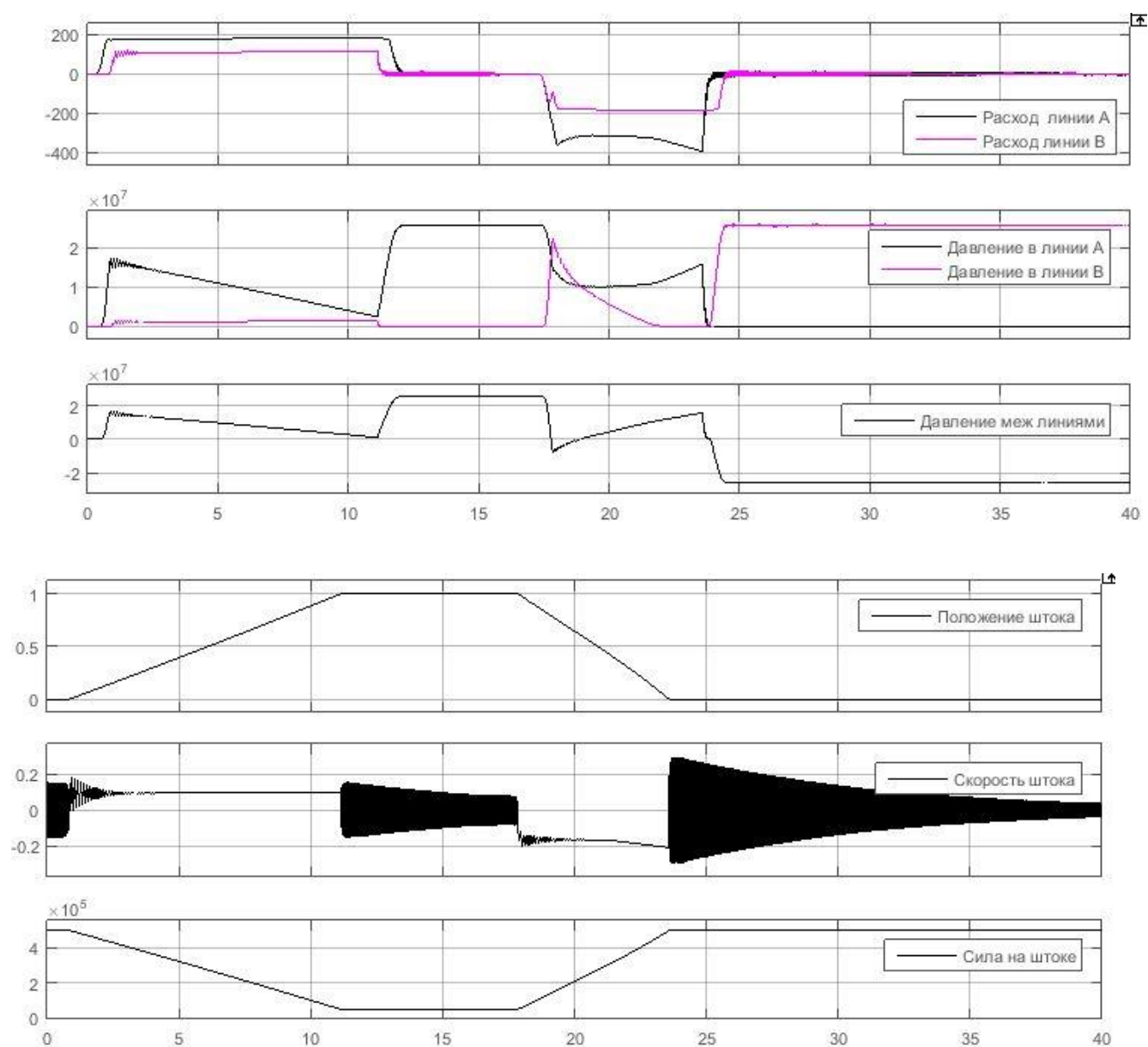




#### А4 – Результаты опыта 4

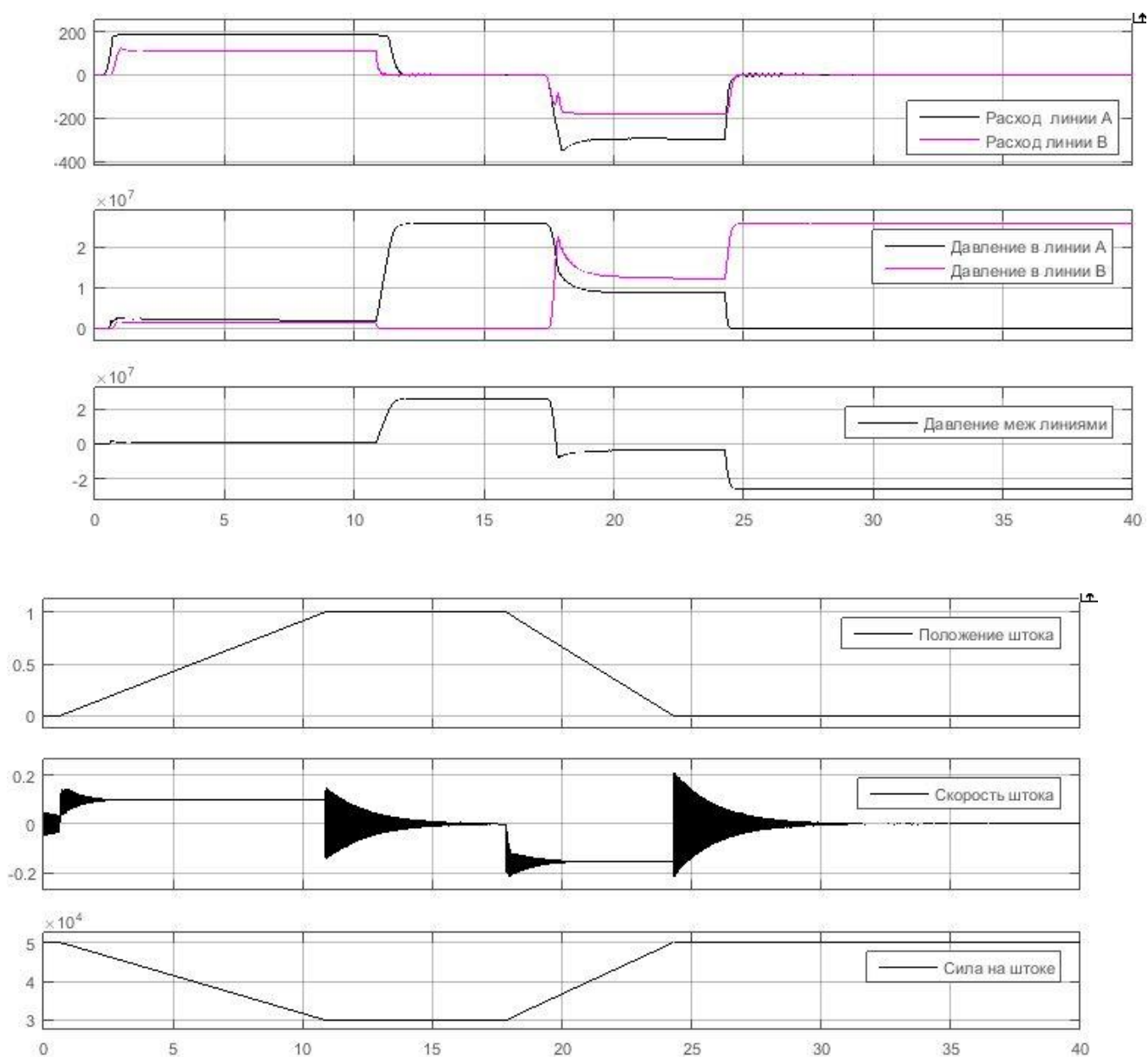


## А5 – Результаты опыта 5



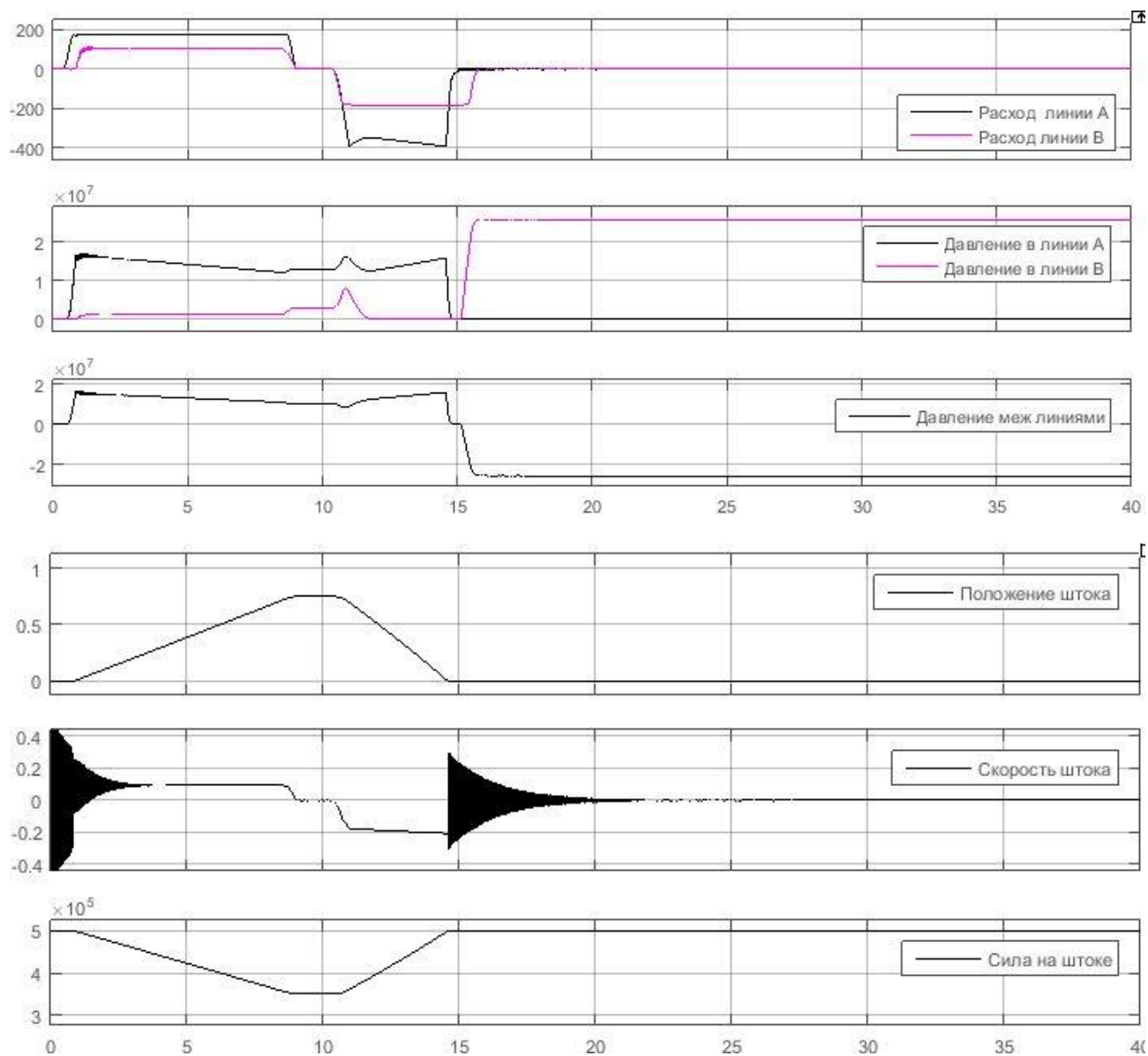


## А6 – Результаты опыта 6

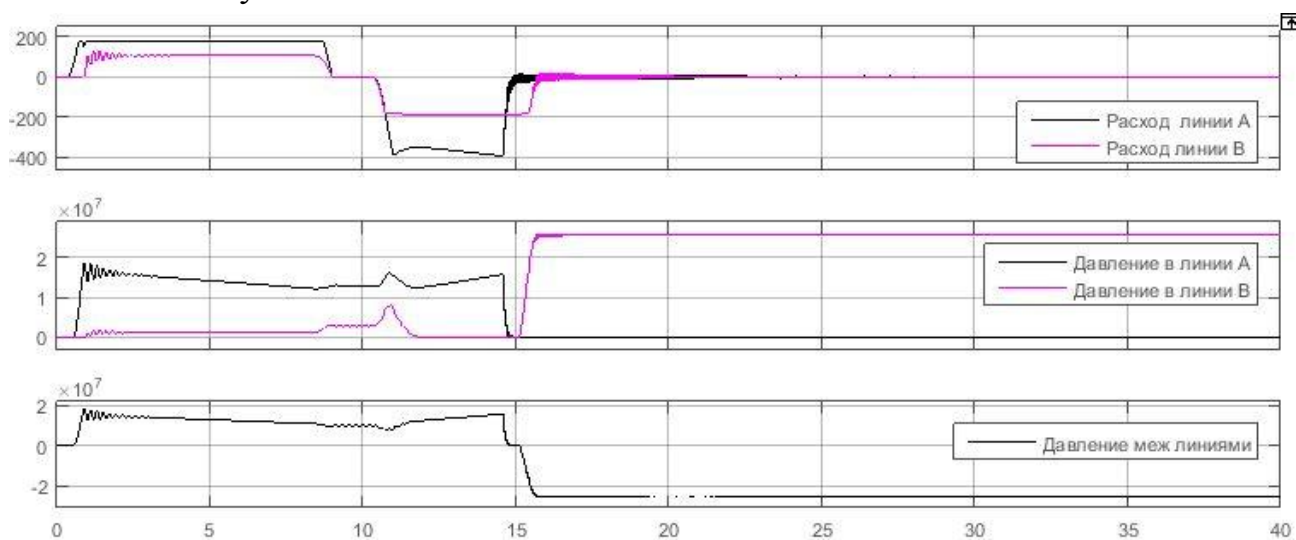


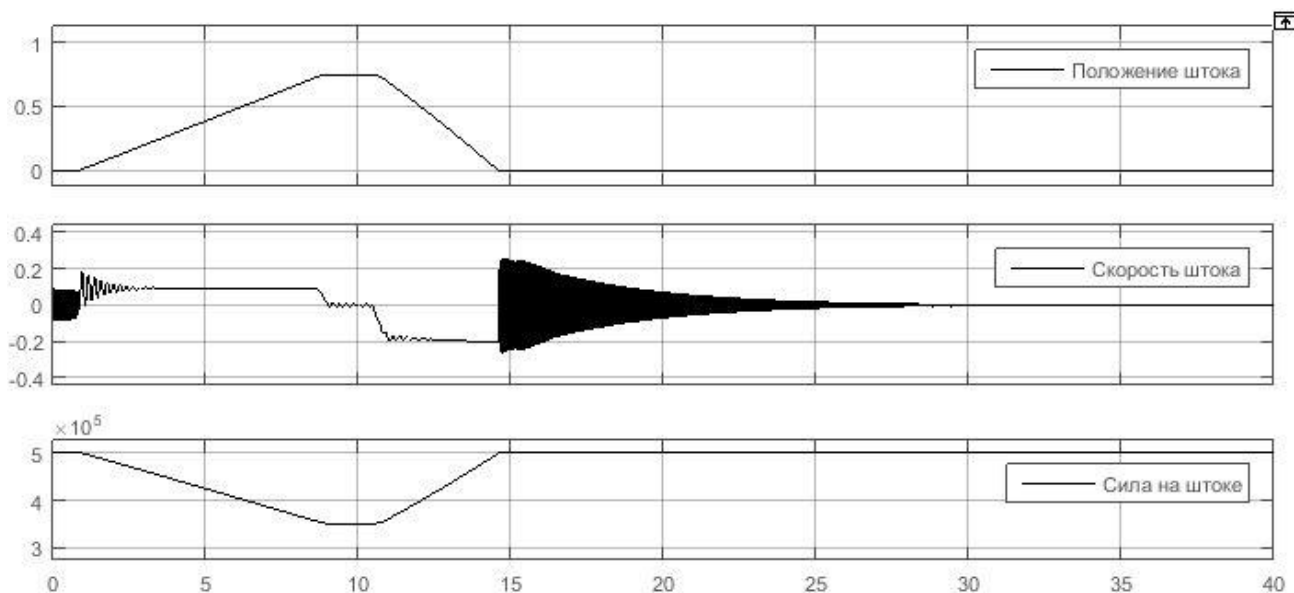
## Приложение Б

### Б1 – Результаты опыта 1

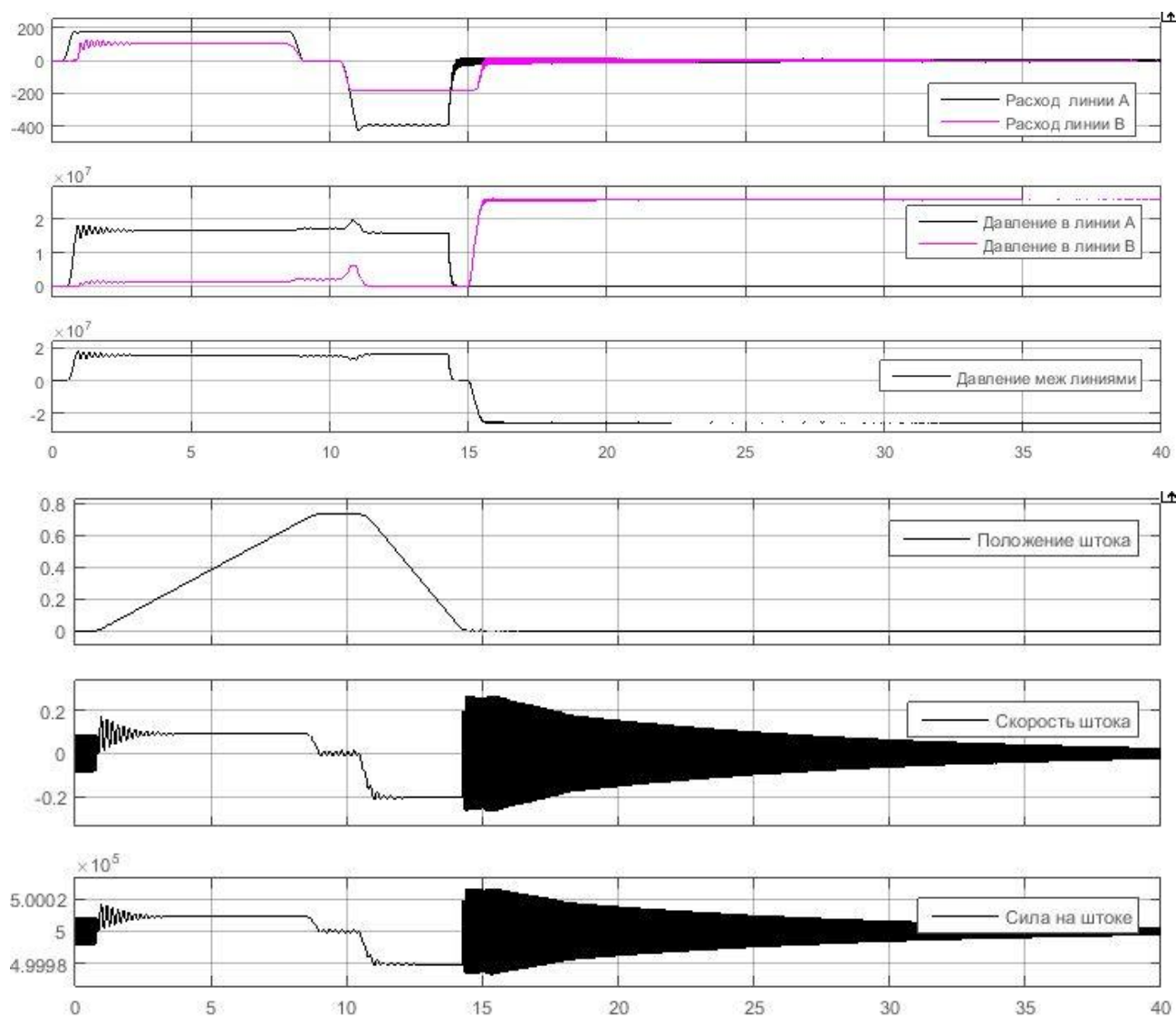


### Б2 – Результаты опыта 2

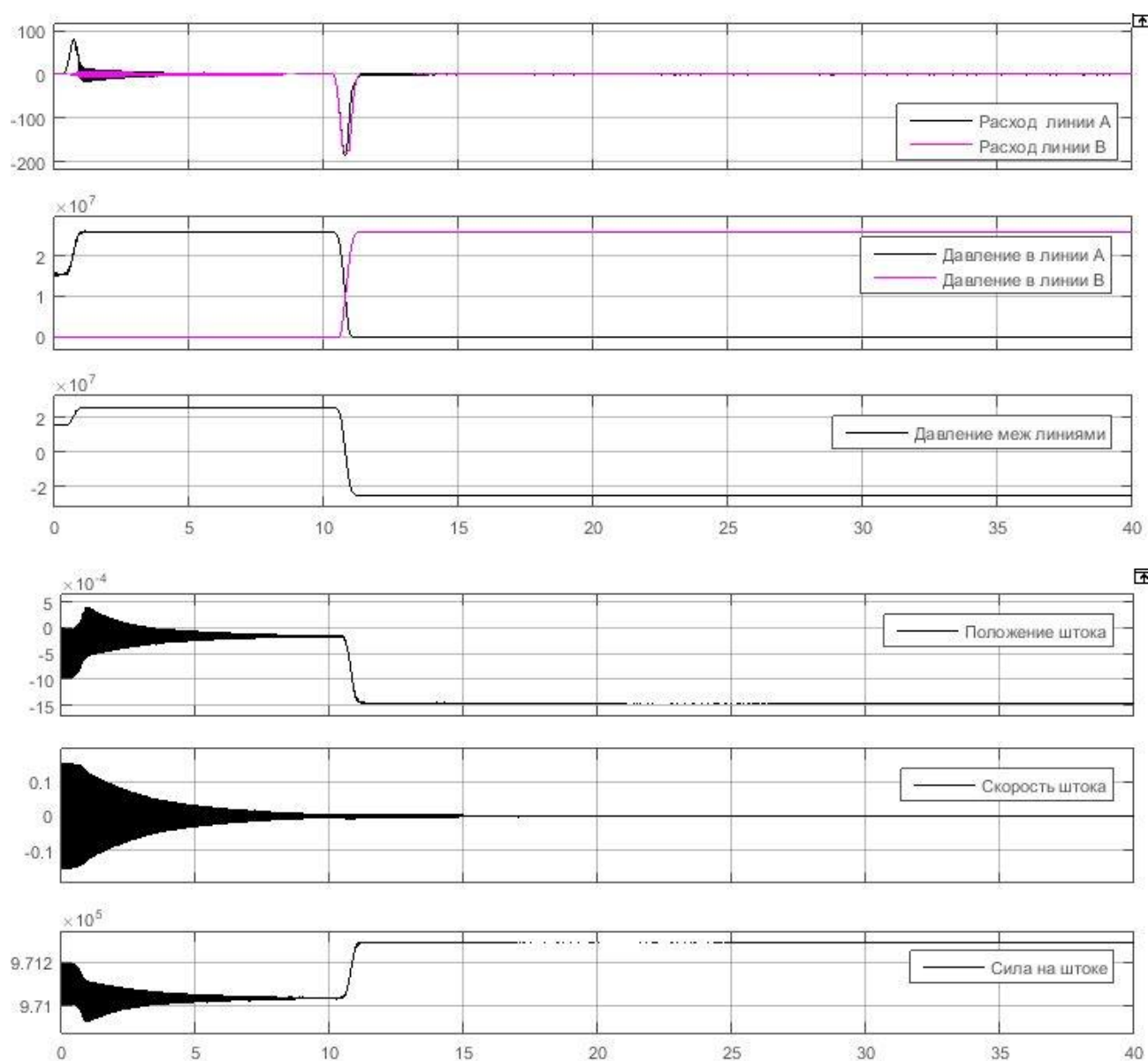




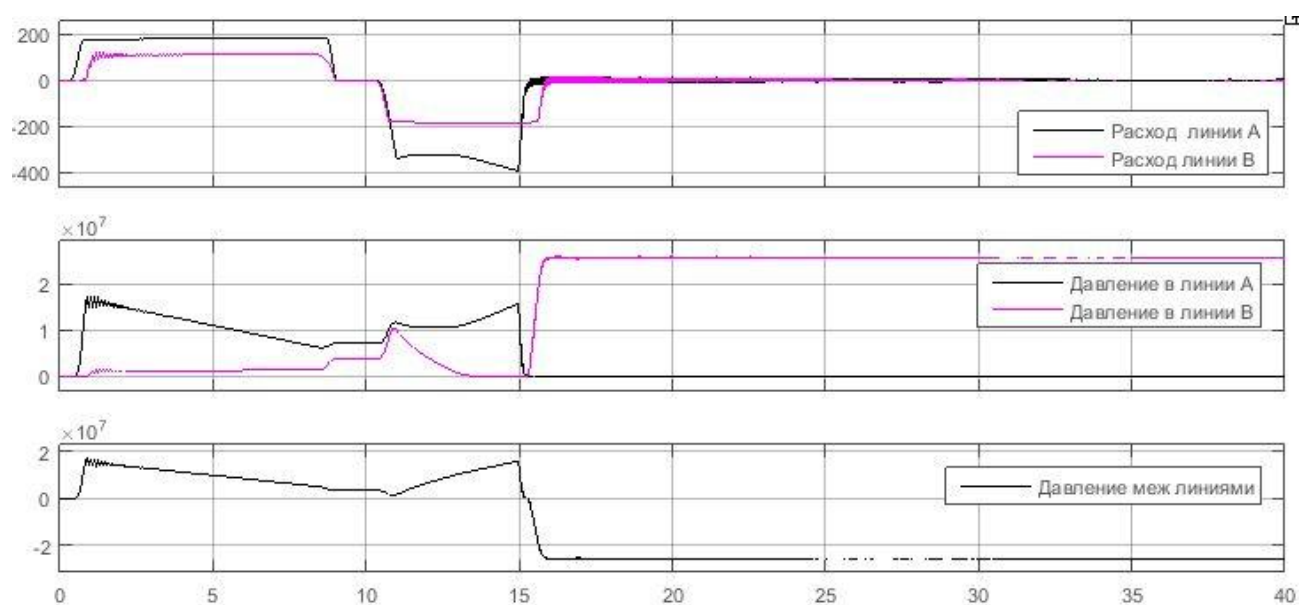
### БЗ – Результаты опыта 3

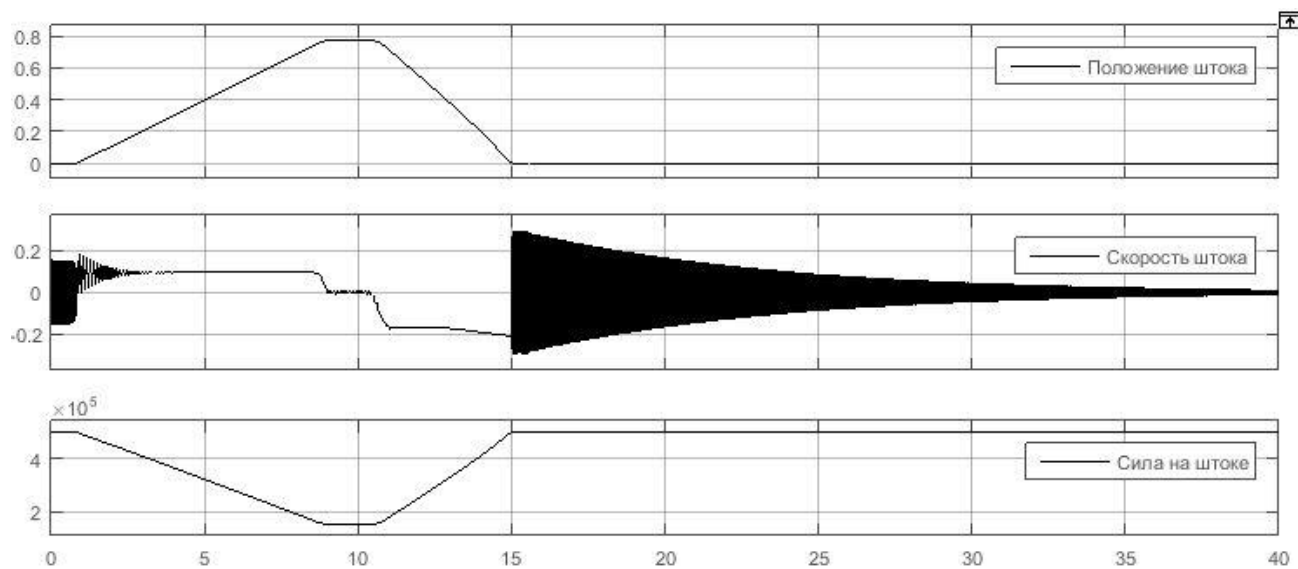


## Б4 – Результаты опыта 4



## Б5 – Результаты опыта 5





## Б6 – Результаты опыта 6

