

Содержание

Введение.....	6
1 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ	8
1.1 Расчет параметров гребного винта.....	9
1.2 Выбор электропривода ВМА.....	11
1.3 Разработка двигателя в среде ANSYS	12
1.4 Выбор датчика положения ротора и датчика скорости	22
1.4.1 Выполнение функций датчика положения ротора	23
1.4.2 Выполнение функций датчика скорости	24
1.5 Математическая модель двигателя	25
1.6 Математическая модель движителя.....	29
1.7 6 Определение параметров магнитной муфты	31
1.7.1 Расчет потерь на экране	35
1.7.2 Расчет момента инерции муфты.....	38
1.8 Математическая модель движителя с магнитной муфтой.....	39
1.9 Математическая модель ВМА	43
1.9.1 Линеаризация математической модели ВМА	45
1.10 Оценка качества переходного процесса замкнутой системы....	53
1.11 Синтез динамически загруженной системы	54
1.12 Построение регулировочной характеристики ВМА	59
2 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ	61
2.1 Описание и обоснование конструкции.....	61
2.2 Расчет диаметра вала ротора.....	63
2.3 Расчет шпоночного соединения на прочность.....	63
3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	66

3.1 Разработка технологического процесса сборки.....	66
3.2 Расчет норм времени	67
4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	75
4.1 Разработка состава и последовательности ОКР	77
4.2 Расчёт продолжительности работ сетевого графика.....	79
4.3 Расчет основных параметров сетевого графика	83
4.4 Анализ сетевого графика.....	86
4.5 Обоснование сметы затрат на выполнение ОКР	92
4.6 Оптимизация сетевого графика.....	94
5 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	96
5.1 Анализ условий труда на рабочем месте инженера	96
5.1.1 Требования к организации рабочих мест инженеров	96
5.1.2 Состав окружающей среды в рабочем помещении.....	99
5.1.3 Акустические факторы.....	102
5.1.4 Требования к освещению рабочих мест	103
5.1.5 Тяжесть и напряженность трудового процесса	107
5.1.6 Итоговая таблица по оценке условий труда работника.....	109
5.1.7 Требования по электробезопасности	111
5.1.8 Требования пожарной безопасности.....	112
5.2 Утилизация деталей ВМА	113
5.2.1 Утилизация полимерных отходов	114
Заключение	117
Список использованной литературы	118
Приложения	120

Введение

Длительный период освоение подводного космоса проводилось с использованием различных типов водолазного снаряжения, но дойдя до определенных глубин, возможности человека работать в водной среде были исчерпаны. Возникла необходимость обеспечить водолазу условия работы под водой, при атмосферном давлении. Такую возможность могли обеспечить обитаемые подводные аппараты (ОПА).

Появление надежных и мобильных ОПА открыло практически новую эпоху в освоении океана. В настоящее время ОПА применяются при осмотре, ремонте, прокладке кабелей и трубопроводов, проверке подводных морских сооружений, платформ, устьев скважин и бурового оборудования. Кроме подводно-технических работ ОПА выполняются поисковые, аварийно-спасательные и научно-исследовательские работы.



Рисунок 1 – Фотография медузы Chrysaora из экспедиции «Акватилис»



Рисунок 2 – Исследования флоры и фауны на Байкале ОПА «МИР»

Целью дипломной работы является разработка винтомоторного агрегата (ВМА) для ОПА. ВМА необходим для обеспечения ходовых и тяговых характеристик ОПА.

Основным качественным параметром ВМА, является тяга, то есть способность создавать в воде упор, позволяющий ОПА передвигаться, преодолевая сопротивление воды.

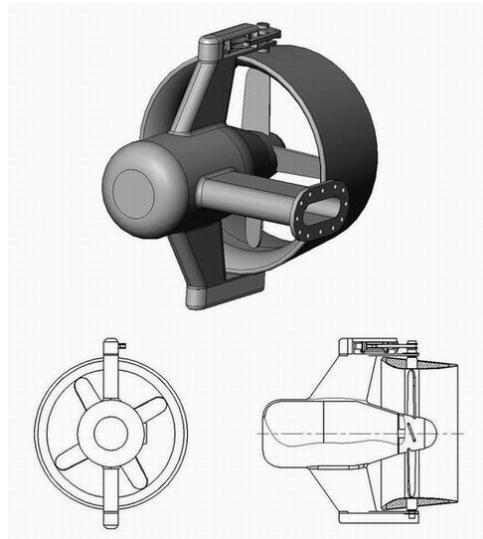


Рисунок 3 – Винтомоторный агрегат

Исходные требования для проектирования ВМА:

- упор ВМА на скорости движения ОПА 2,5м/с не менее 900 Н;
- диаметр гребного винта не более 0,3 м;
- потребляемая мощность не более 10 кВт;
- тип ВМА - «гребной винт в направляющей насадке»;
- тип привода- вентильный электродвигатель;
- для передачи момента к ГВ использовать магнитную муфту;
- напряжение сети постоянного тока от 120 до 164В;
- требование к регулированию – обеспечить плавное регулирование с использованием ОС по скорости вращения.

1 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

С учетом исходных требований проектируемый ВМА состоит из следующих основных частей:

- электродвигатель;
- модуль управления электродвигателем;
- прочный корпус с кронштейном крепления;
- вал с магнитной муфтой;
- гребной винт;
- насадка винта.

В рамках исследовательской части дипломной проекта произведены:

- расчет гребного винта;
- подбор электропривода;
- расчет параметров магнитной муфты;
- создание математической модели ВМА и ее линеаризация;
- синтез системы управления ВМА, обеспечивающий плавное регулирование с использованием обратной связи по скорости вращения.

При помощи средств MATLAB Simulink будет произведено моделирование работы ВМА с использованием математической модели, учитывающей нелинейности системы.

1.1 Расчет параметров гребного винта

Расчет гребного винта (ГВ) [1] осуществляется с целью определения его основных параметров, таких как момент вращения M , скорость вращения n и потребляемая мощность N_p , которые необходимы для обеспечения требуемой скорости V ОПА. Следующим шагом является подбор двигателя по полученным параметрам.

Произведем расчет ГВ, руководствуясь следующими требованиями:

- $V = 2,5 \text{ м/с}$ – скорость движения ОПА;
- $P = 900 \text{ Н}$ – упор;
- $D = 0,3 \text{ м}$ – диаметр ГВ;
- $N_p = 10 \text{ кВт}$ – потребляемая мощность двигателя;
- тип движителя – «гребной винт в насадке».

ГВ выбираем из набора четырехлопастных ($z = 4$) винтов в направляющей насадке ($\alpha_h = 1,3$; $\beta_h = 1,12$; $l_h = 0,60$) с дисковым отношением $\theta = 0,75$.

Исходя из списка накладываемых ограничений, расчет будет проводится через вспомогательную величину:

$$K'_d = D \cdot V \cdot \sqrt{\frac{\rho}{P}} = 0,3 \cdot 2,5 \cdot \sqrt{\frac{1000}{900}} = 0,79.$$

По диаграммам $K_\kappa = f(\lambda_p)$ [1] определим относительную поступь ГВ λ_e , коэффициенты упора K_κ и K_{max} и шаговое отношение H/D:

$$\lambda_e = 0,5;$$

$$K_\kappa = 0,42;$$

$$K_{max} = 0,72;$$

$$H/D = 1,34.$$

Рассчитаем частоту вращения ГВ через относительную поступь

$$\lambda_e = \frac{V}{D \cdot n};$$

$$n = \frac{V}{\lambda_e \cdot D} = \frac{2,5}{0,5 \cdot 0,3} = 16,6 \frac{\text{об}}{\text{с}} = 1000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Проведем проверку упора движителя на скорости $V = 2,5$ м/с :

$$P = K_k \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 = 0,42 \cdot 1000 \cdot (16,6)^2 \cdot (0,3)^4 = 937,45 \text{ Н.}$$

Упор превышает заданное значение ($P = 900$ Н), следовательно, расчет произведен правильно.

Упор движителя P_{max} в швартовном режиме $V = 0$ м/с :

$$P_{max} = K_{kmax} \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 = 0,72 \cdot 1000 \cdot (16,6)^2 \cdot (0,3)^4 = 1674 \text{ Н.}$$

Рассчитаем крутящий момент M на скорости $V = 2,5$ м/с и M_{max} в швартовном режиме ($V = 0$ м/с).

По диаграммам $10K_2 = f(\lambda_p)$ [1] определим коэффициенты момента K_2 и K_{2max} :

$$K_2 = 0,069;$$

$$K_{2max} = 0,082.$$

Тогда крутящий момент будет :

$$M = K_2 \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5 = 0,069 \cdot 1000 \cdot (16,6)^2 \cdot (0,3)^5 = 46,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{max} = K_{2max} \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5 = 0,082 \cdot 1000 \cdot (16,6)^2 \cdot (0,3)^5 = 55,24 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Определим механическую мощность двигателя N_p

$$N_p = M \cdot \omega = M \cdot 2\pi \cdot n = 2\pi \cdot 41,98 \cdot 16,6 = 4820 \text{ Вт.}$$

Определим КПД выбранного ГВ η :

$$\eta = \frac{N_b}{N_p} = \frac{P \cdot V}{M \cdot \omega} = \frac{P \cdot V}{M \cdot 2\pi \cdot n} = \frac{937,45 \cdot 2,5}{4820} = 0,48 = 48\%.$$

1.2 Выбор электропривода ВМА

Электропривод ВМА должен иметь минимальные массогабаритные показатели, повышенную надежность системы, минимальное потребление электрической энергии, плавное регулирование частоты вращения, возможность быстрого реверса.

Основные критерии выбора двигателя ограничиваются исходным данными и полученными параметрами в ходе расчета гребного винта:

- тип привода - вентильный двигатель;
- напряжение сети постоянного тока - 120 В..164 В;
- номинальная скорость - 1000 об/мин;
- номинальный момент - 47 Н · м;
- механическая мощность - 5 кВт.

К сожалению, двигатель который бы полностью удовлетворял данным требованиям, отсутствует в готовом виде на рынке электроприводов.

Поэтому было принято решение разработать двигатель в пакете ANSYS RMxprt. Данный пакет позволяет смоделировать электрическую машину стандартного типа по известным методикам расчета. ANSYS RMxprt использует классическую аналитическую теорию электрических машин и метод эквивалентной магнитной цепи для вычисления рабочих характеристик машины.

1.3 Разработка двигателя в среде ANSYS

Главной задачей моделирования двигателя сводится к нахождению оптимальной характеристики. Определяющим фактором которой будет:

- КПД, потому что уменьшение потребляемой мощности для автономного аппарата приводит к снижению необходимой емкости аккумуляторной батареи, следовательно, к увеличению времени работы подводного аппарата в автономном режиме, что не мало важно для данного типа ПА;
- Массогабаритные показатели, потому что увеличение диаметров двигателя больше размера ГВ вызовет перекрытие потока, тем самым уменьшив упор. Однако в конструкции ВМА можно предусмотреть плавный сход потока, который не влияет на упор, а увеличение веса скомпенсировать плавучестью. Получается, что увеличение габаритов и веса двигателя не критично скажутся на ходовые и энергетические характеристики ВМА. Но следя здравому смыслу, стоит максимально облегчить конструкцию ВМА.

Для начала зададим данные для моделирования. За номинальную точку механической характеристик примем значения, полученный в ходе расчета гребного винта на скорости движения ПА 2,5м/с ($n=1000$ об/мин, $M=47$ Н · м)

При многократном моделировании было получено КПД равное 92% в малом диаметре двигателя 150 мм и длине 140 мм. Параметры двигателя представлены в таблице 1 под 1-ым вариантом. По контурному графику (рисунок 4) видно, что пик КПД (95%) сдвинут в область больших оборотов при мощности 4,5кВт. Для сдвига пика КПД в номинальную точку, необходимо увеличить магнитный поток полюса на зуб, что достигается путем увеличения магнита.

Таблица 1 – Характеристики моделируемых двигателей

Варианты	1	2
Наименования	Значения	
Задаваемые параметры		
Потребляемая мощность, Вт	5000	
Номинальное напряжение, В	120	
Номинальная частота вращения, об/мин	1000	
Соединение обмоток	Звезда	
Число пар полюсов	8	
Количество зубцов на статоре	18	
Внешний диаметр статора, мм	150	175
Внутренний диаметр статора, мм	90	
Длина статора, мм	140	
Воздушный зазор между статором и ротором, мм	1,5	
Длина ротора	140	147
Отношение ширины магнита к диаметру ротора	0,65	0,6
Толщина магнита, мм	3,5	9
Количество проводников в слоте	14	18
Количество проводов в проводнике	13	15
Смоделированные параметры		
Общий вес, кг	11,5651	18,3935
Плотность потока в зубе статора, Тл	1,24547	1,43608
Плотность потока в ярме статора, Тл	1,00698	0,829668
Плотность потока в ярме ротора, Тл	0,839152	0,512911
Максимальная ЭДС, В	66,019	102,981
Входной ток, А	45,3067	44,0901
Среднеквадратичный Фазный Ток, А	67,9819	43,8881
Потери в железе, Вт	63,0971	111,718
Потери в меди, Вт	304,892	142,66
Общие потери, Вт	434,397	288,668
Выходная мощность, Вт	5002,41	5002,14
КПД, %	92,0101	94,544

В таблице 1 представлен 2-ой вариант моделирования с изменёнными параметрами. КПД двигателя стало 94,5 %, что также показано на контурном графике (рисунок 5). Но пик КПД (95%) все еще находится на 4кВт.

По двум вариантам можно судить о динамике характеристик двигателя. КПД двигателя вырос на 2,5%, а вес на 6,8 кг. Дальнейшее увеличение меди приводит к увеличению диаметра при той же длине и как следствие увеличение веса при незначительном росте КПД.

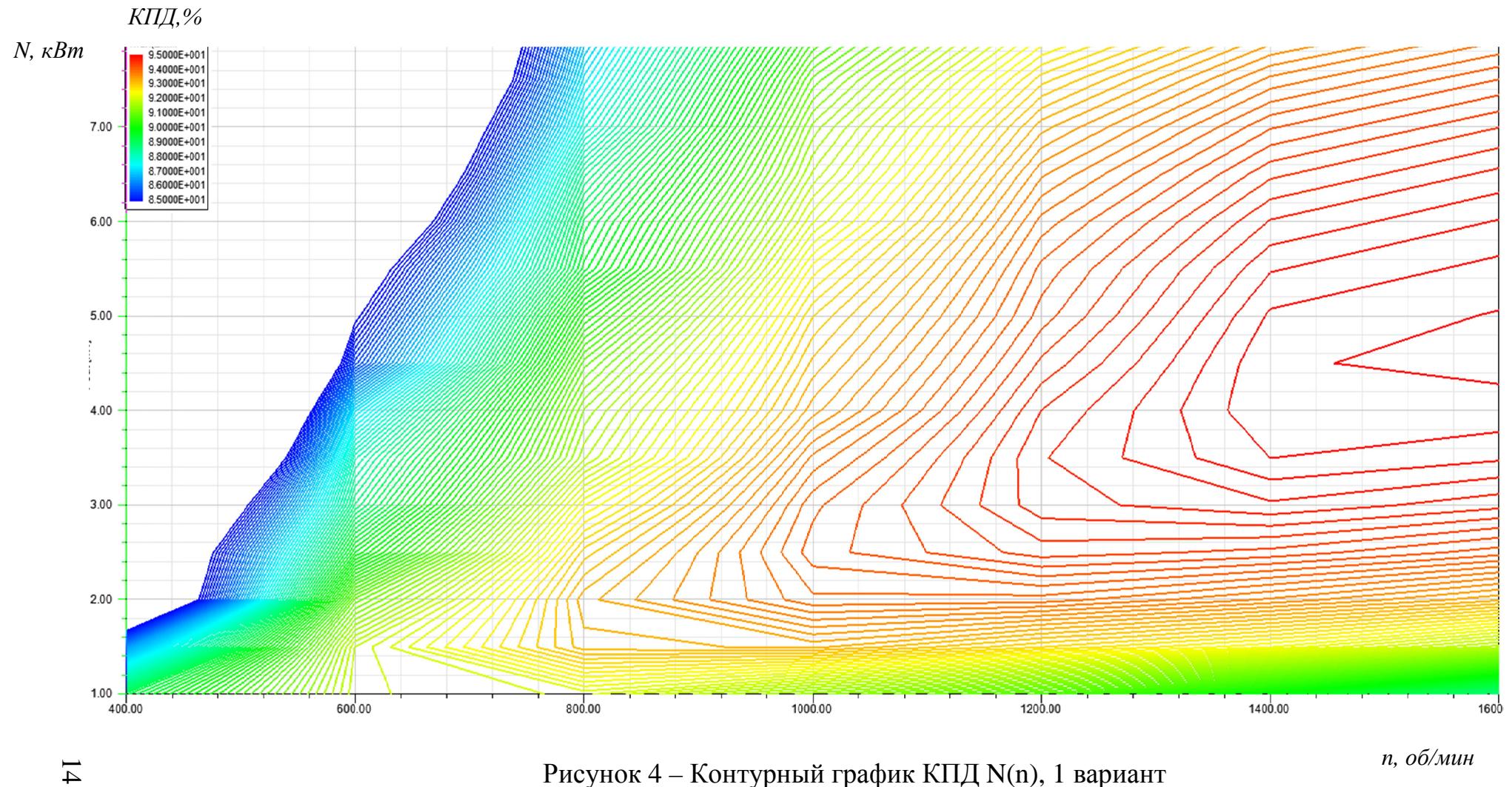
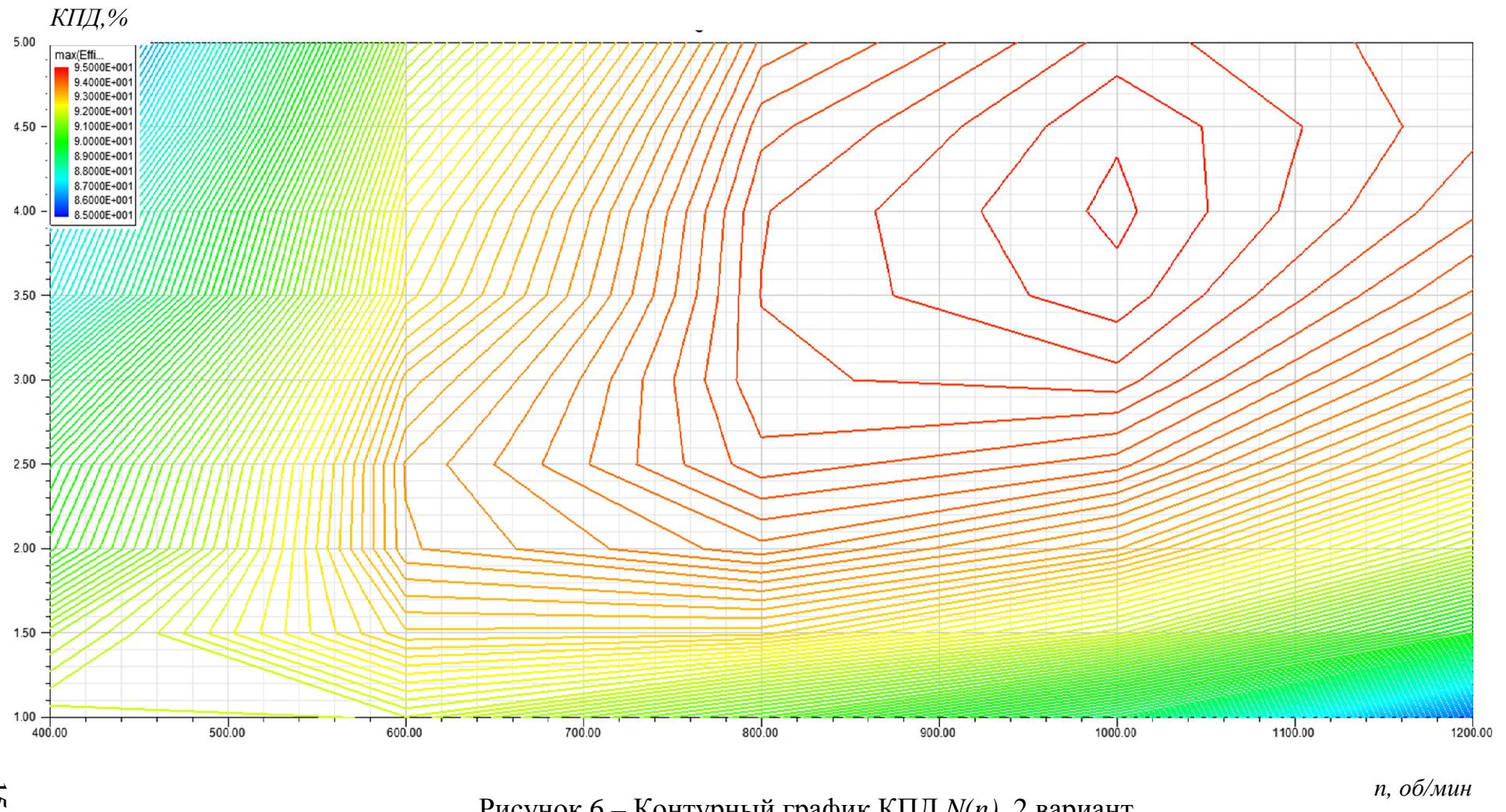


Рисунок 4 – Контурный график КПД $N(n)$, 1 вариант

$N, \text{кВт}$



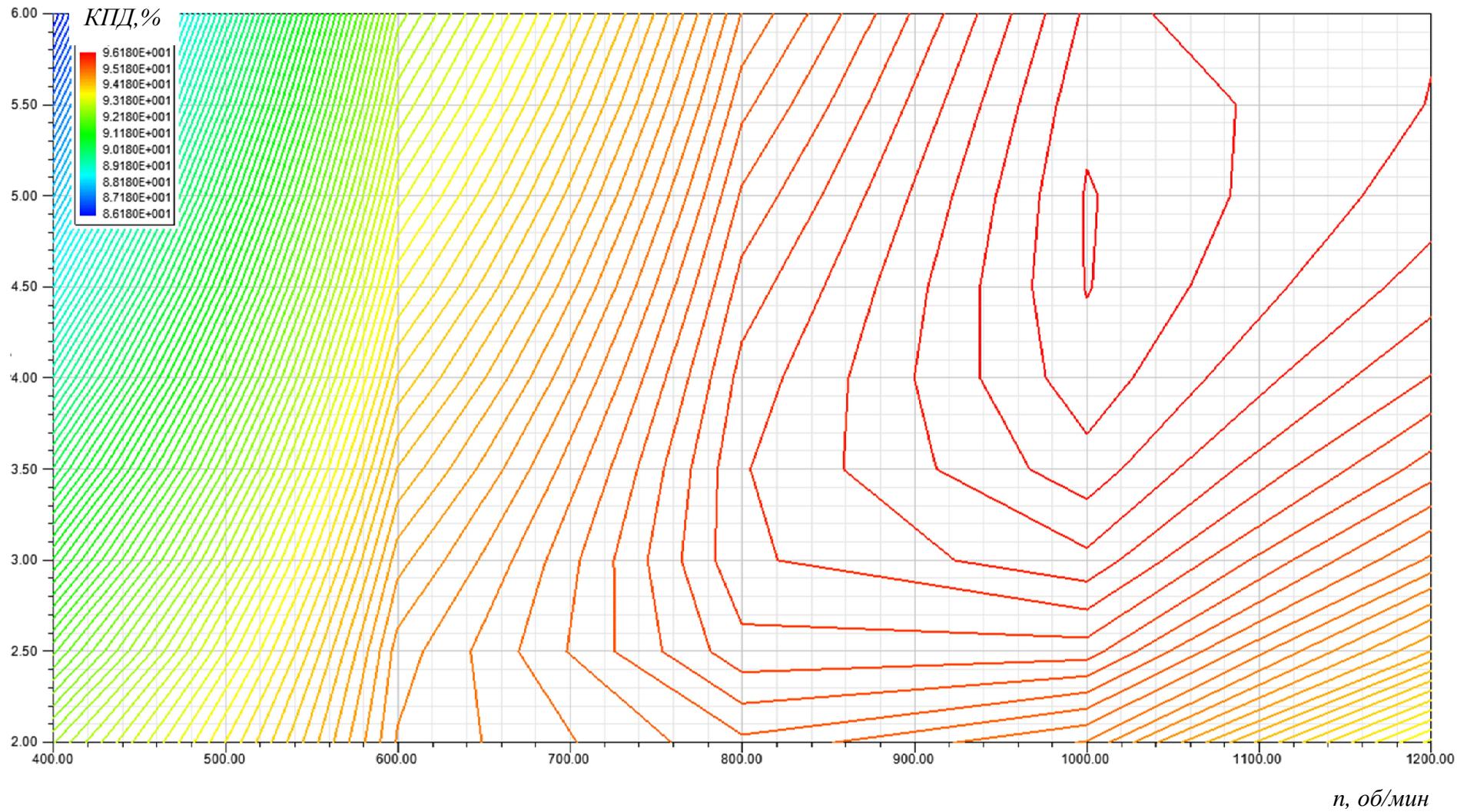
Для решения данной проблемы увеличим диаметр двигателя до 280 мм и уменьшим длину до 50 мм, таким образом механически увеличим момент двигателя и ширину магнита.

Таблица 2 – Характеристики моделируемых двигателей

Варианты	3	4
Наименования	Значения	
Задаваемые параметры		
Потребляемая мощность, Вт	5000	
Номинальное напряжение, В	120	
Номинальная частота вращения, об/мин	1000	
Соединение обмоток	Звезда	
Число пар полюсов	11	
Количество зубцов на статоре	24	
Внешний диаметр статора, мм	280	
Внутренний диаметр статора, мм	205	
Длина статора, мм	50	
Воздушный зазор между статором и ротором, мм	1,5	
Длина ротора, мм	50	
Отношение ширины магнита к диаметру ротора, %	0,6	0,56
Толщина магнита, мм	5,2	6
Количество проводников в слоте	18	
Количество проводов в проводнике	15	
Смоделированные параметры		
Общий вес, кг	12,8149	12,693
Плотность потока в зубе статора, Тл	1,28621	1,25685
Плотность потока в ярме статора, Тл	0,684506	0,668025
Плотность потока в ярме ротора, Тл	0,748295	0,79901
Максимальная ЭДС, В	97,9982	96,8956
Входной ток, А	43,3198	43,3141
Среднеквадратичный Фазный Ток, А	42,8604	43,3539
Потери в железе, Вт	78,5369	74,9404
Потери в меди, Вт	86,3106	88,3095
Общие потери, Вт	198,141	197,247
Выходная мощность, Вт	5000,24	5000,45
КПД, %	96,1884	96,2051

Характеристика 3-его варианта представлена в таблице 2. КПД стало 96,18% и по контурному графику (рисунок 6) видно, что пик КПД находится в номинальной точке, что и требовалось.

$N, \text{кВт}$



Л

Рисунок 6 – Контурный график КПД $N(n)$, 3 вариант

Теперь в RMxprt воспользуемся параметризацией данных для увеличения КПД. За искомые параметры выберем толщину магнита t и отношение длины магнита на диаметр ротора (Embrace). На рисунке 7 изображен график КПД от Embrace, построенный при разных значениях толщины магнита. По графику (рисунки 7,8) находим параметры магнита при максимальном КПД. Получаем $t = 6\text{мм}$, $\text{em} = 0.56\%$.

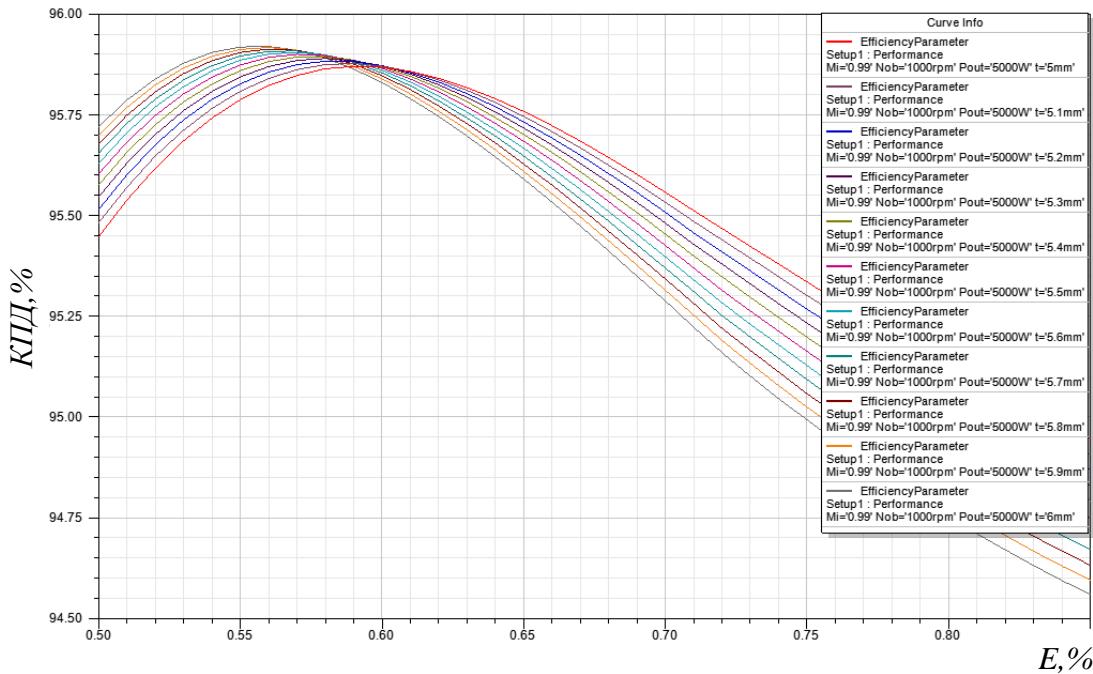


Рисунок 7 – График КПД от Embrace при $t = 5\dots6\text{мм}$

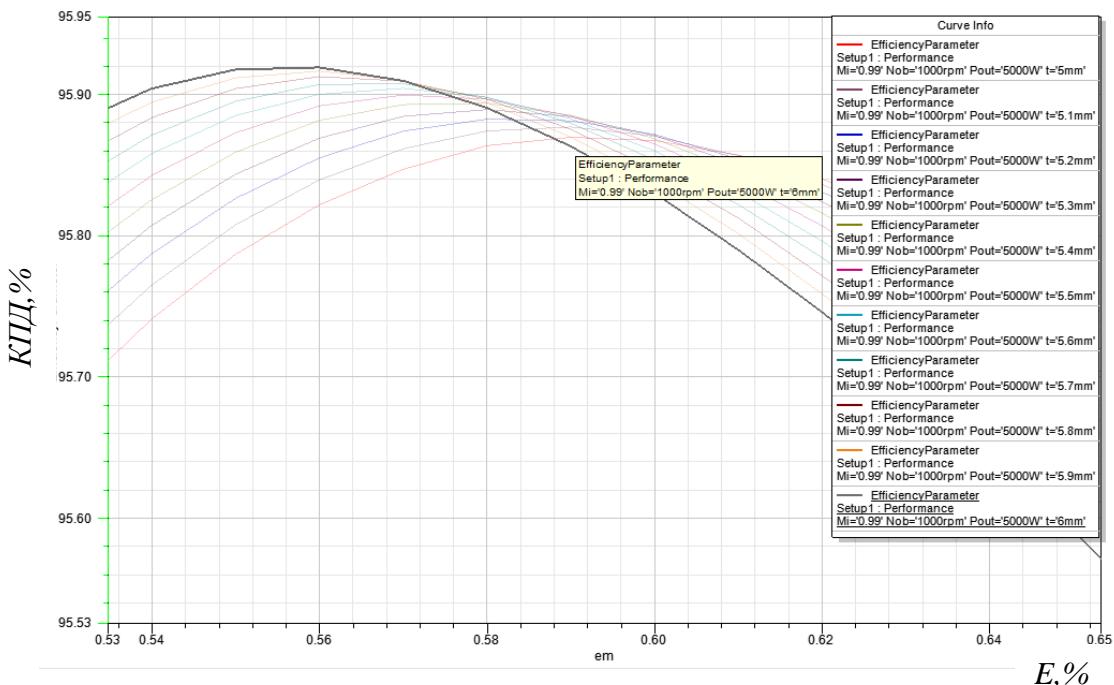


Рисунок 8 – График КПД от Embrace при $t = 5\dots6\text{мм}$ (увеличенено)

$N, \text{кВт}$

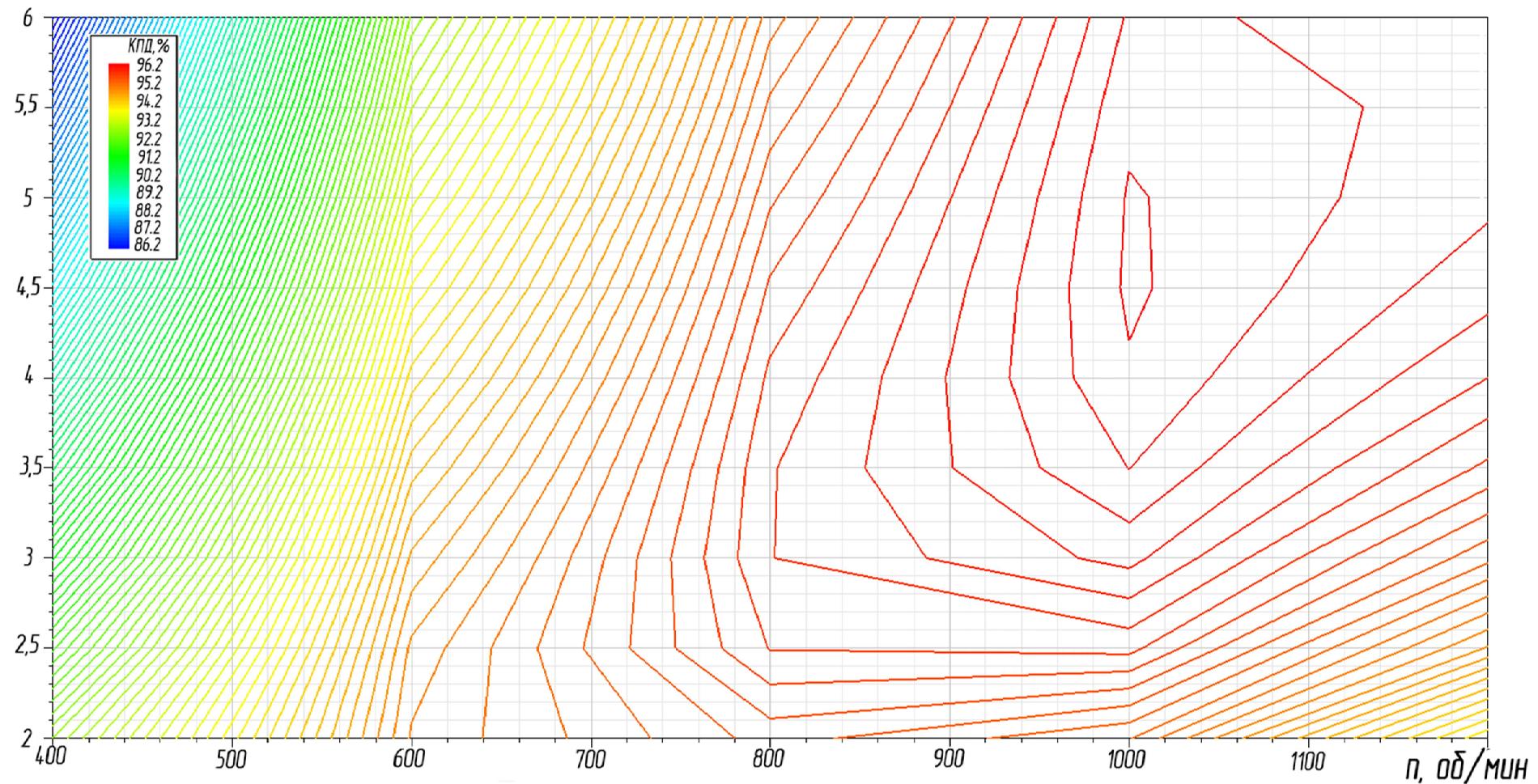


Рисунок 9 – Контуруный график КПД $N(n)$, 4 вариант

Характеристика 4-его варианта и его контурный график представлены в таблице 2 и на рисунке 9, соответственно. 4-ый вариант двигателя имеет самое высокое КПД и малый вес, по сравнению с другими рассматриваемыми вариантами.

По подобранным параметрам построена механическая характеристика, которая изображена на рисунке 10. Она имеет характерную нелинейность. Это свойство имеют все вентильные двигатели. Оно является следствием влияния индуктивности фаз на коммутационные и межкоммутационные периоды.

$M, \text{Нм}$

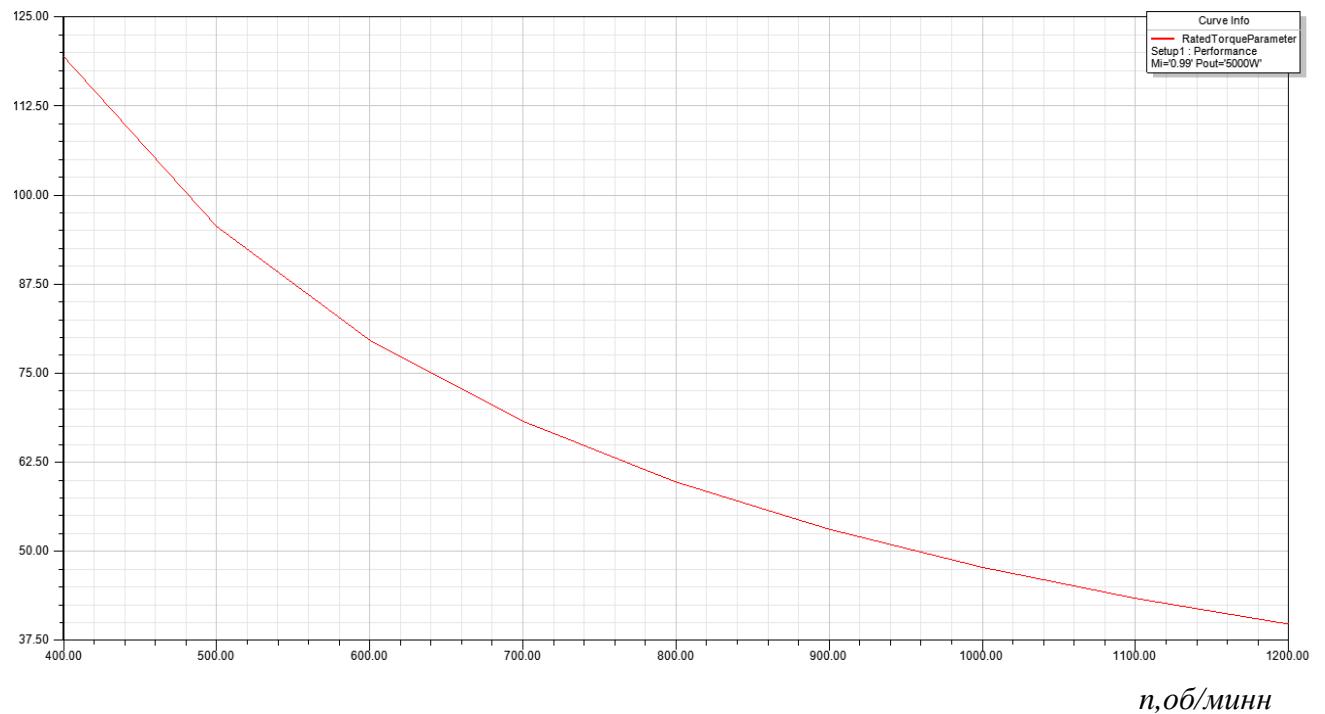


Рисунок 10 – Механическая характеристика двигателя

В таблице 3 представлены характеристики двигателя для составления математической модели.

Таблица 3 – Характеристики двигателя

Наименования	Обозначения	Значения
Потребляемая мощность, кВт	N	5
Номинальное напряжение, В	U	120
Номинальная частота вращения, об/мин	n	1000
Номинальный момент, Нм	M _н	47,7
Фазный ток	I _n	43,3А
Константа момента, Нм/А	Km	1.102
Константа скорости, В·с/рад	Kw	0,78
Сопротивление двух фаз, Ом	R	0,03
Индуктивность фазы, Гн	L	2,5·10-4
Момент инерции ротора, кг·м ²	J _p	0,0637

1.4 Выбор датчика положения ротора и датчика скорости

В качестве датчика положения ротора и датчика скорости будем использовать энкодер, датчик угла поворота AM8192B, в инкрементном режиме (рисунок 11).

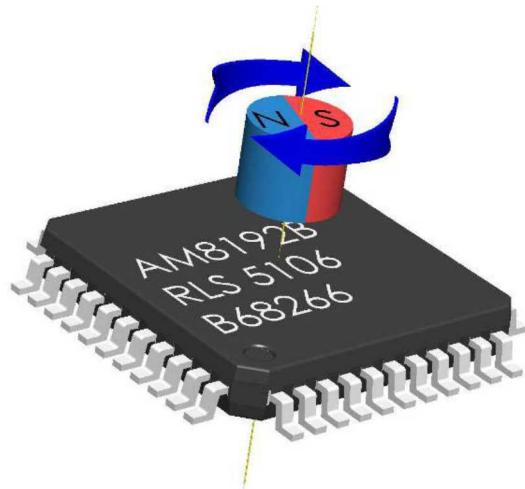


Рисунок 11 – Датчик угла поворота AM8192B

AM8192B определяет угловое положение постоянного магнита, расположенного над микросхемой. В датчике используется технология датчика Холла, которая определяет плотность распределения магнитного потока.

Характеристики датчика приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики AM8192B

Диаметр магнита, мм	4
Выходной сигнал	ТТЛ, SSI
Разрешающая способность, имп/об	8192
Напряжение питания, В	5
Интервал рабочих температур, °C	от -40 до +150

1.4.1 Выполнение функций датчика положения ротора

Коммутация в обмотке вентильного двигателя осуществляется по сигналу датчика положения ротора (ДПР), через равные угловые промежутки поворота ротора ϑ . Обычно в вентильных двигателях в качестве ДПР используются датчики Холла. В проектируемом двигателе используется импульсный инкрементный датчик, который будет совершать каждое последующее переключение в обмотке (отключение одной фазы и одновременное подключение другой фазы) через N импульсы:

$$N = \frac{\vartheta}{p} \cdot \frac{Z}{2 \cdot \pi}$$

где Z – количество импульсов за один оборот ротора;

ϑ – межкоммутационный период, эл. рад;

p – число пар полюсов.

Рассчитаем минимальный межкоммутационный период.

Для этого примем $N = 1$

$$\vartheta = \frac{N \cdot 2 \cdot \pi \cdot p}{Z} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8}{8192} = 0,0028 \text{ эл. рад} = 0,16^\circ.$$

Для работы импульсного датчика угла как ДПР, необходимо знать начальное положения ротора. Поэтому в начале работы двигателя происходит программная настройка датчика на нейтральную коммутацию, которая осуществляется тестовыми поворотами вала в разные направления.

1.4.2 Выполнение функций датчика скорости

Импульсный датчик может выполнять функции измерителя скорости двигателя. Средняя угловая скорость ротора на протяжении углового интервала поворота между соседними импульсами составляет

$$\omega_{cp} = \frac{\Delta\vartheta}{T} = \Delta\vartheta f = \frac{2 \cdot \pi}{Z} f,$$

где

$\Delta\vartheta$ –угловой интервал между двумя импульсами;

T, f –период и частота импульсов датчика.

Найдем максимальную частоту обработки датчика:

$$f_{max} = \frac{\omega_{cp} \cdot Z}{2 \cdot \pi} = \frac{1000 \cdot 8192}{60 \cdot 2 \cdot \pi} = 21 \text{ кГц.}$$

1.5 Математическая модель двигателя

Математическая модель двигателя, построенная в RMxprt, в дальнейшем должна использоваться для моделирования системы управления в среде Ansys, с помощью подключаемого модуля ANSYS Simplorer, для проведения комплексного анализа всей системы.

Моделирование работы ВМА происходит в программном пакете MATLAB. Для составления полной нелинейной модели двигателя в MATLAB, которая полностью соответствовала бы математической модели в ANSYS, нужен опыт владения пакетом ANSYS и более глубокие знания в теории вентильных двигателей. Поэтому аппроксимируем нелинейность механической характеристики прямой и пользуясь данными RMxprt (таблица 3), построим линейную модель вентильного двигателя в MATLAB по дифференциальным уравнениям, аналогичным уравнениям для коллекторного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов:

$$\begin{cases} U = L \frac{di}{dt} + R \cdot i + K_\omega \cdot \omega \\ J_p \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} + M_{\text{н}} \\ M_{\text{дв}} = K_m \cdot i \end{cases} \quad (1)$$

где,

U – управляющее напряжение;

L – индуктивность обмоток статора;

R – сопротивление обмоток статора;

i – ток обмотки статора;

K_ω – коэффициент противо-ЭДС;

ω – скорость вращения;

J_p – момент инерции ротора;

$M_{\text{дв}}$ – момент двигателя ;

$M_{\text{н}}$ – момент нагрузки;

K_m – моментный коэффициент.

Проверим данные допущения. Для этого построим механическую характеристику по табличным данным RMxprt в Excel.

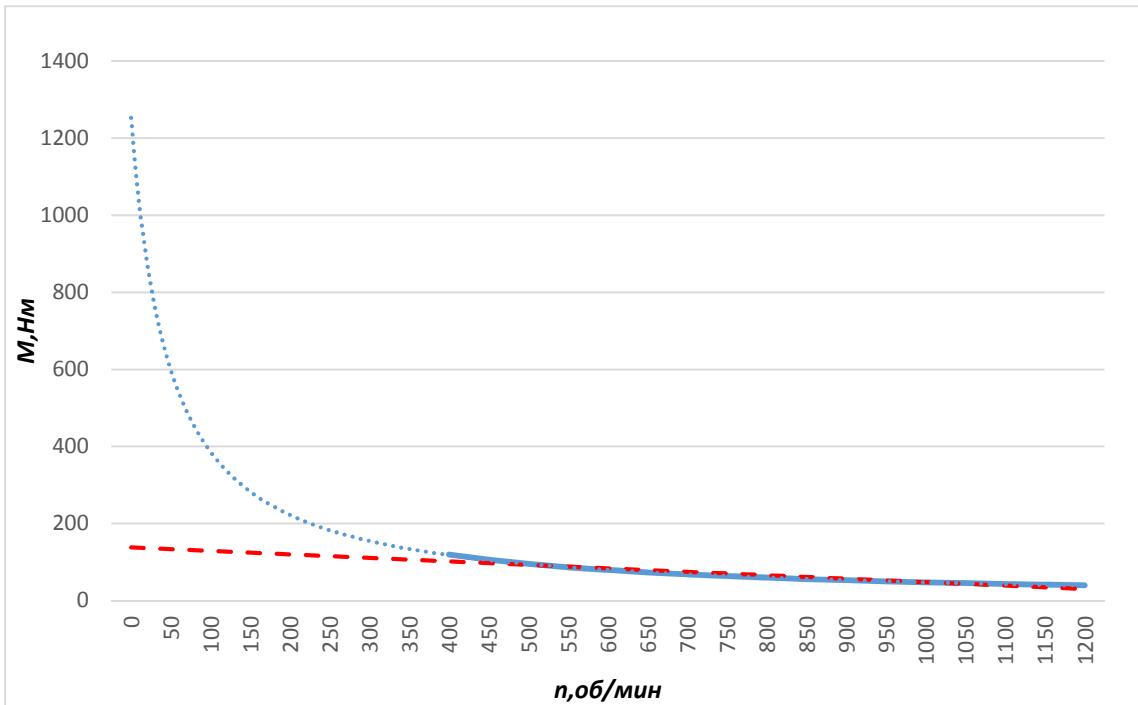


Рисунок 12 – Аппроксимация механической характеристики

На рисунке 12 синей сплошной линией показана рабочая зона механической характеристики, построенная по данным RMxprt, синей точечной линией – реальная нелинейная механическая характеристика, которая описывается степенной зависимостью момента от частоты вращения и красной пунктирной – линейная аппроксимация. Механическая характеристика в увеличенном виде изображена на рисунке 13, на котором наглядно можно оценить погрешность линейной аппроксимации.

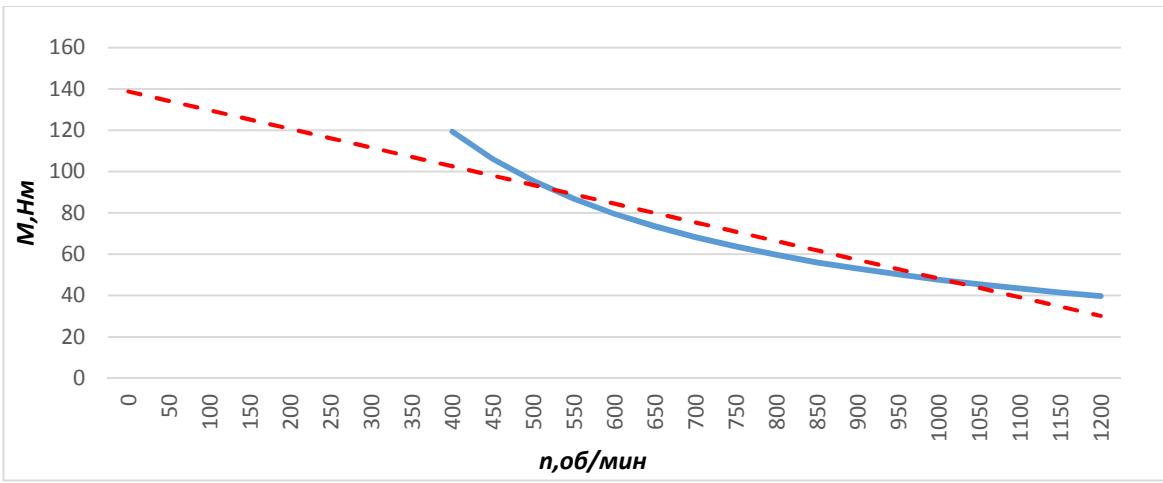


Рисунок 13 – Аппроксимация механической характеристики двигателя (увеличенено)

Анализируя рисунки 12, 13 можно сделать вывод, что данная аппроксимация допустима в рабочей зоне двигателя.

Теперь построим структурную схему двигателя (рисунок 14), используя систему уравнений (1) и нагрузим его номинальным моментом $M_H = 47,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Если линейная математическая модель двигателя соответствует модели двигателя в RMxprt, то на выходе получим номинальные данные RMxprt с некоторой погрешностью (таблица 3).

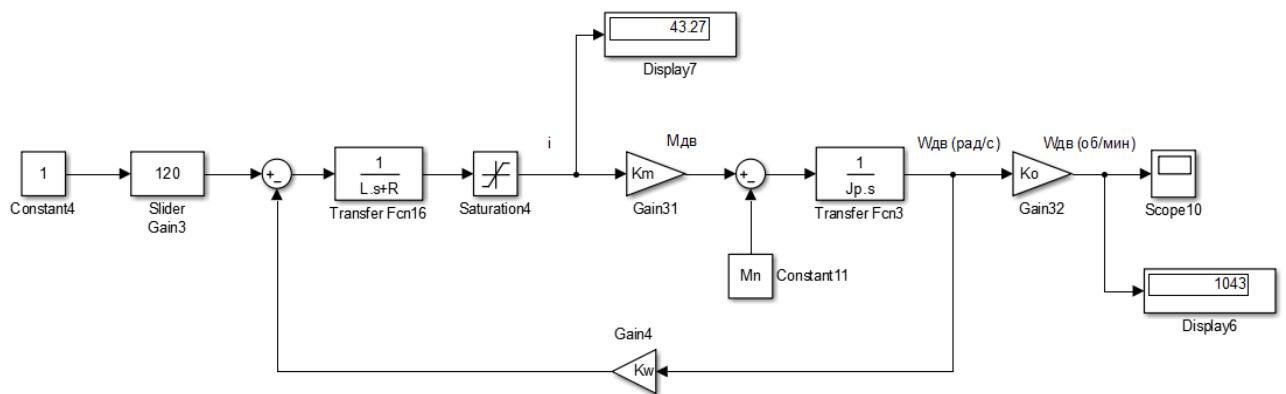


Рисунок 14 – Структурная схема линейной модели двигателя

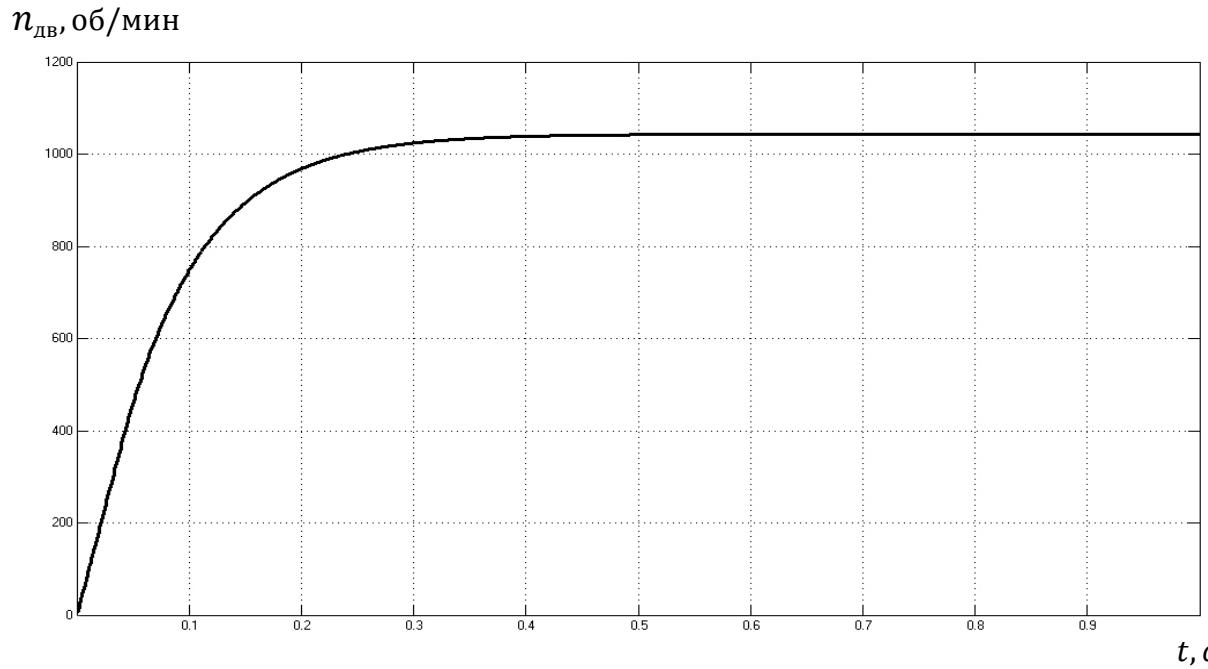


Рисунок 15 – Переходной процесс $n_{дв}(t)$ при отработке сигнала $U=120$ В
 $(M_H = 47,7 \text{ Н} \cdot \text{м})$

Также введем в цепь тока ограничитель в 100 А, для обеспечения защиты электроники двигателя от перегрузок по току в процессах пуска.

Двигатель при обработке сигнала $U=120$ В имеет частоту вращения в установившемся режиме равной 1043 об/мин, ток - 43,27А, что примерно соответствует номинальным данным ($n_n = 1000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, $I_n = 43,3\text{A}$), полученным в ходе моделирования двигателя в пакете ANSYS RMxprt. Получается, линейная математическая модель двигателя по данным RMxprt построена в Matlab правильно.

1.6 Математическая модель движителя

Построим математическую модель движителя, используя системы уравнений (1) и (2). Для этого добавим в модель (рисунок 14):

- вентиляторный момент в качестве момента нагрузки;
- моменты инерции гребного винта и присоединённые массы гребного винта, в качестве моментов инерции нагрузки.

$$\begin{cases} U = L \frac{di}{dt} + R \cdot i + K_{\omega} \cdot \omega \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} + M_{\text{в}} \\ M_{\text{дв}} = K_m \cdot i \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_{\text{в}} = K_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{н}}^2 \cdot \text{sign}\omega_{\text{н}} \\ P = K_p \cdot \omega_{\text{н}}^2 \cdot \text{sign}\omega_{\text{н}} \end{cases} \quad (2)$$

где

J – суммарный момент инерции нагрузки:

$$J = J_p + J_{\text{пр.м}} + J_{\text{гв}} = 0,0637 + 0,00616 + 0,00752 = 0,07738 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 ;$$

– J_p – момент инерции ротора: $J_p = 0,0637 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;

– $J_{\text{пр.м}}$ – момент инерции присоединенных масс гребного винта:

$$\begin{aligned} J_{\text{пр.м}} &= 33 \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot D^5 \cdot z \cdot \left(\frac{H}{D} - 0,4 \right) \cdot \left(\frac{\theta}{z} + 0,04 \right) \cdot \left(1,3 - 0,3 \frac{H}{D} \right) = \\ &= 0,00616 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 ; \end{aligned}$$

– $J_{\text{гв}}$ – момент инерции гребного винта найден с помощью SW:

$$J_{\text{гв}} = 0,00752 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 ;$$

$K_{\text{в}} = K_2 \cdot \rho \cdot D^5 = 0,1676$ – вентиляторный коэффициент;

$K_p = K_k \cdot \rho \cdot D^4 = 3,402$ – коэффициент упора.

Структурная схема движителя и переходной процесс по оборотам $\omega(t)$ представлены на рисунках 16 и 17, соответственно, где

$K_0 = 60/2 \cdot \pi = 9,549$ – коэффициент пересчета оборотов из рад/с в об/мин;

$K = \frac{1}{2} \cdot \pi = 0,159$ – коэффициент пересчета оборотов из рад/с в об/с.

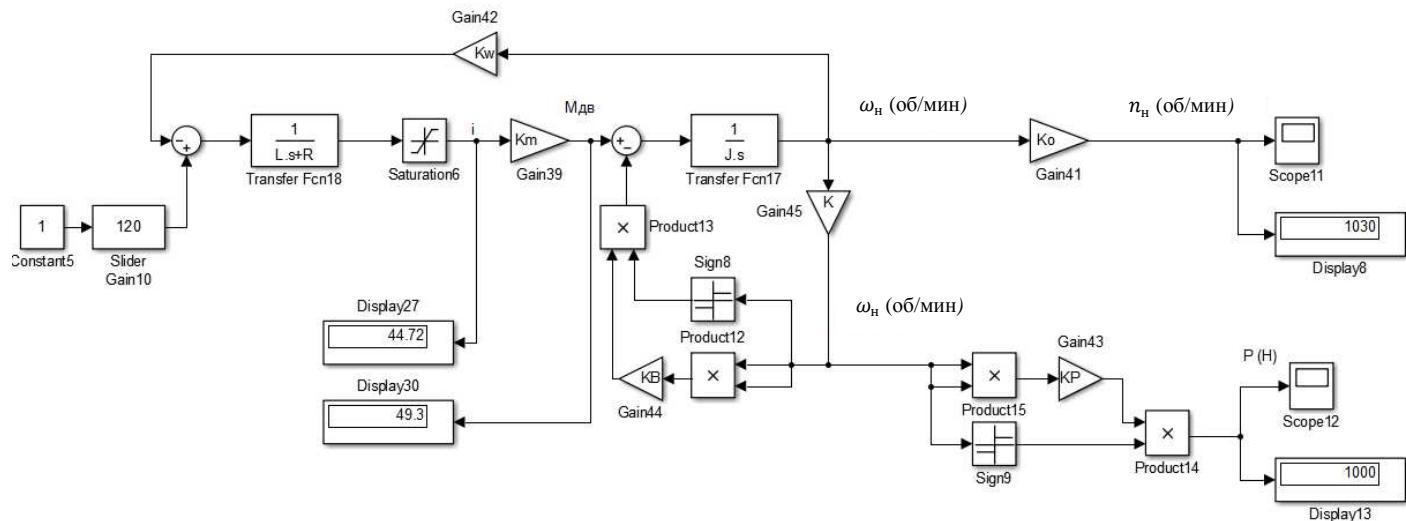


Рисунок 16 – Структурная схема нелинейной модели движителя

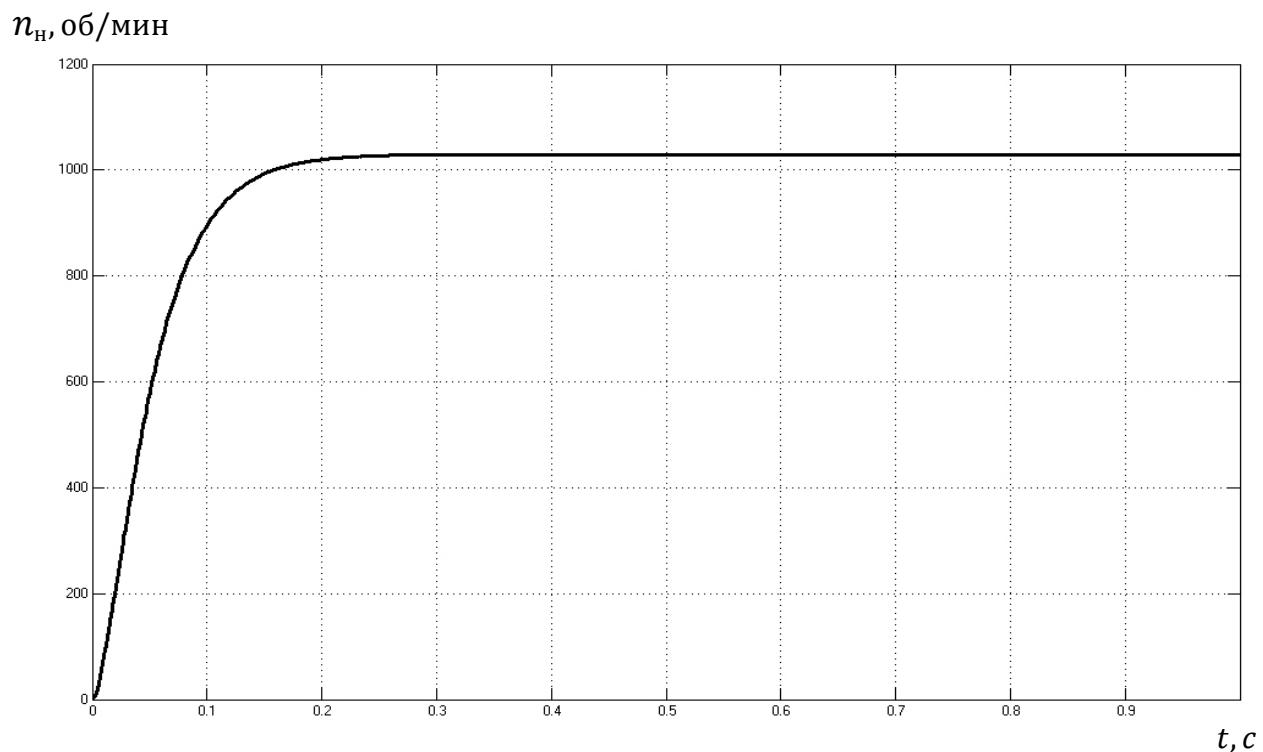


Рисунок 17 – Переходной процесс $n_h(t)$ движителя при отработке сигнала $U=120$ В

1.7 6 Определение параметров магнитной муфты

Герметичность электродвигателя ВМА осуществляется с помощью магнитной муфты, состоящей из двух полумуфт, между которыми в воздушном зазоре размещен экран, герметично отделяющий двигатель ВМА от окружающей среды (рисунок 18). Передача крутящего момента осуществляется за счет магнитных сил, действующих между полумуфтами магнитной муфты без контакта каких-либо частей полумуфт.

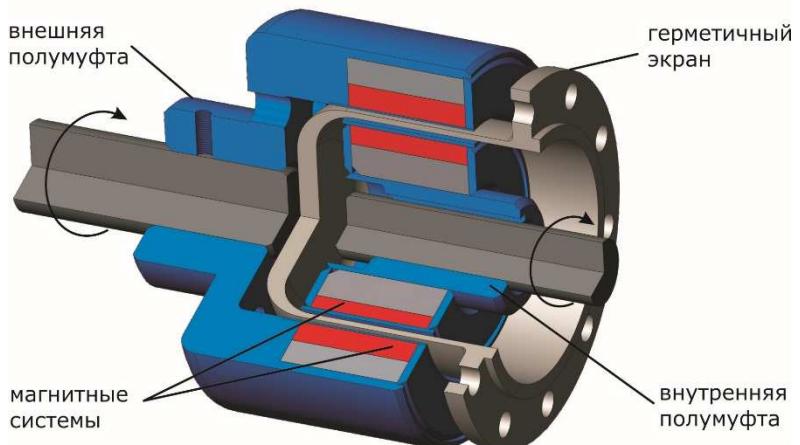


Рисунок 18 – Схема магнитной муфты

Максимальный крутящий момент, передаваемый муфтой, должен превышать действующие, при работе крутящих моментов, от сил сопротивления (трения, нагрузки и инерции), в противном случае возможен разрыв магнитной связи между полумуфтами (полумуфты магнитной муфты вращаются с разными частотами, следовательно, и резко уменьшается передаваемый момент).

Так же после остановки, связанной с восстановлением магнитной связи после разрыва, крутящий момент муфты полностью восстанавливается, то есть муфта может использоваться в качестве предохранительного звена.

После окончания разгона, момент передаваемый муфтой, уменьшается (следовательно, уменьшается и угол рассогласования) за счет исчезновения ускорения вращающихся масс и устанавливается рабочий режим работы муфты и двигателя.

Динамику двигателя с магнитной муфтой обычно рассматривают, приводя все моменты инерции и действующие моменты к ведущей и ведомой полумуфтам.

Уравнение движения двигателя с магнитной муфтой

$$\begin{cases} J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = M_{\text{дв}} - M_{\text{м}} - \frac{1}{2}M_{\text{з}} - M_{\text{тр1}} \\ J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M_{\text{м}} - \frac{1}{2}M_{\text{з}} - M_{\text{в}} - M_{\text{тр2}} \end{cases}, \quad (3)$$

где

$M_{\text{дв}}$ – электромагнитный момент электродвигателя, Н · м;

$M_{\text{м}}$ – момент, передаваемый муфтой при смещении полумуфт, Н · м;

$M_{\text{з}}$ – тормозной момент экрана, Н · м;

$M_{\text{в}}$ – вентиляторный момент;

$M_{\text{тр}}$ – момент трения муфты о среду, Н · м;

J_1 – момент инерции ведущей части, кг · м²;

J_2 – момент инерции ведомой части, кг · м²;

ω_1 – частота вращения ведущей полумуфты, об/с;

ω_2 – частота вращения ведомой полумуфты, об/с.

Крутящий момент, передаваемый магнитной муфтой, зависит от угла рассогласования полюсов полумуфт и описывается уравнением:

$$M_m = M_{\max} \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2) = M_{\max} \cdot \sin(\varphi N/2),$$

где

M_{\max} – максимальный статический момент магнитной муфты, Н · м;

α_1 – электрический угол поворота ведущей полумуфты, рад;

α_2 – электрический угол поворота ведущей полумуфты, рад;

$(\alpha_1 - \alpha_2)$ -электрический угол рассогласования полюсов полумуфт, рад,

$$\text{причем } (\alpha_1 - \alpha_2) = \varphi N/2;$$

φ – геометрический угол рассогласования полюсов полумуфт, рад,

N – число полюсов в муфте.

Магнитная муфта по ее назначению, отделяет рабочую область от окружающей среды. Ведущая полумуфта и двигатель находятся в воздушной среде, в которой момент трения M_{tr1} мал, в следствии чего, его можно не учитывать. Ведомая полумуфта в рабочей области находится в воде. Величина трения гладкостенной цилиндрической ведомой полумуфты о жидкость незначительна и момент трения M_{tr2} можно не учитывать.

Максимальный крутящий момент, передаваемый муфтой, должен превышать действующие при работе крутящие моменты нагрузки. Так как вентиляторный момент – самый большой момент нагрузки, то выбор момента магнитной муфты будет основываться на вентиляторном моменте при швартовом режиме.

Максимальный момент, который развивает гребной винт при швартовном режиме:

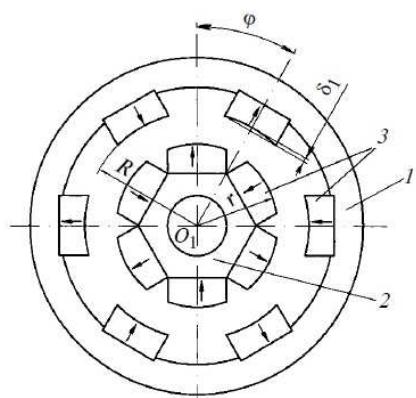
$$M_{Bmax} = 55,24 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Для определения параметров цилиндрической магнитной муфты воспользуемся готовым решением, которое описано в работе [5].

Из таблицы 5 выбираем магнитную муфту по моменту.

Таблица 5 – Параметры цилиндрической магнитной муфты

Размеры магнита, мм	r , мм	R , мм	N , шт.	J , кА/м	M_p , Н · м	M_3 , Н · м	$\frac{(M_3 - M_p) \cdot 100}{M_3}$, %
15 × 30 × 8	22	22,75	6	880	6,51	7,3	10,8
15 × 30 × 8	25	30,5	6	880	7,55	8,39	10,0
20 × 30 × 10	40	44	10	848	33,6	34,6	2,9
20 × 30 × 10	60	65	16	848	65,6	63,5*	—
20 × 40 × 10	40	44	10	848	51,9	57,0	8,9
20 × 50 × 10	66,5	71,5	18	848	151,1	155,0	2,6
20 × 70 × 10	66,5	71,5	18	800	199,0	199,0	0



1 – наружная полумуфта;
 2 – внутренняя полумуфта;
 3 – магниты;
 R – внутренний радиус наружной полумуфты по магнитам;
 r – наружный радиус внутренней полумуфты по магнитам.

Рисунок 19 – Цилиндрическая магнитная муфта

Максимальный момент выбранной муфты $M_{Mmax} = 57$ Н · м с учетом запаса в 3%.

1.7.1 Расчет потерь на экране

Тормозящий момент экрана M_{ϑ} , в системе уравнений (3) зависит от потерь в мощности на экране, пропорциональных частоте вращения двигателя. Действие момента экрана на обе полумуфты равно по величине и создается за счет колебаний как ведущей, так и ведомой полумуфты.

Потери в токопроводящем экране рассчитываются по формуле:

$$P_{\vartheta} = 31 \cdot \frac{B_d^2 \cdot D_{\vartheta}^3 \cdot n_m^2 \cdot l_{\vartheta} \cdot \delta_{\vartheta}}{\rho}$$

где

B_d - действующее значение магнитной индукции в зазоре между муфтами, Тл;

D_{ϑ} - наружный диаметр экрана цилиндрической магнитной муфты, м;

n_m - частота вращения муфты, об/с;

δ_{ϑ} - толщина стенки экрана, м;

ρ - удельное электрическое сопротивление материала экрана, Ом;

l_{ϑ} – реактивная длина магнита вдоль оси вращения, м;

Расчет тормозного момента в токопроводящем экране проводится по формуле:

$$M_{\vartheta} = 0,159 \cdot \frac{P_{\vartheta}}{n_c},$$

где

P_{ϑ} – потери в экране, Вт;

n_c – частота вращения электродвигателя, об/с;

Подставим значение P_{ϑ} в формулу для M_{ϑ} :

$$M_{\vartheta} = 0,159 \cdot 31 \cdot \frac{B_d^2 \cdot D_{\vartheta}^3 \cdot n_m^2 \cdot l_{\vartheta} \cdot \delta_{\vartheta}}{\rho \cdot n_c}$$

Так как $n_c = n_m$, то

$$M_{\vartheta} = 4,929 \cdot \frac{B_d^2 \cdot D_{\vartheta}^3 \cdot l_{\vartheta} \cdot \delta_{\vartheta}}{\rho} \cdot n$$

Выразим тормозящий коэффициент экрана K_{ϑ} из формулы:

$$M_{\vartheta} = K_{\vartheta} \cdot n,$$

$$K_{\vartheta} = 4,929 \cdot \frac{B_d^2 \cdot D_{\vartheta}^3 \cdot l_{\vartheta} \cdot \delta_{\vartheta}}{\rho}$$

Для определения тормозящего коэффициента экрана вычислим значение действующей индукции B_d :

$$B_d = \beta_d \cdot K_j \cdot B_r,$$

где

K_j - безразмерный коэффициент, учитывающий уменьшение намагниченности магнита в муфте; значение его лежит в пределах 0,90-0,95

B_r – остаточная индукция материала

$$B_r = \mu_0 \cdot J,$$

где

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [Гн/м] магнитная постоянная;

$J = 848$ [кА/м] намагниченность магнита ;

$$B_r = \mu_0 \cdot J = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 848 \cdot 10^3 = 1,065 \text{ Тл} ;$$

β_d – безразмерный коэффициент действующей индукции в зазоре муфты, зависящий от относительно полюсного деления τ_0 магнитной муфты:

$$\tau_0 = \frac{\pi \cdot (D + \delta)}{N \cdot \delta};$$

D – наружный диаметр внутренней полумуфты по магнитам, м;

N – число полюсов в муфте;

δ – зазор между полумуфтами по магнитам, м;

$$\tau_0 = \frac{\pi \cdot (D + \delta)}{N \cdot \delta} = \frac{\pi \cdot (40 + 4)}{10 \cdot 4} = 3,46\%;$$

Выбираем по $\tau_0 = 3,46$, $\beta_d = 0,5$.

По полученным данным рассчитаем значение действующей индукции:

$$B_d = \beta_d \cdot K_j \cdot B_r = 0,5 \cdot 0,92 \cdot 1,065 = 0,4899 \text{ Тл};$$

Вычислим K_3 :

$$K_3 = 4,929 \cdot \frac{B_d^2 \cdot D_3^3 \cdot l_3 \cdot \delta_3}{\rho} = 4,929 \cdot \frac{(0,49)^2 \cdot (43,25 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{7,1 \cdot 10^{-8}} = \\ 0,00694 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\frac{\text{об}}{\text{с}}};$$

где

$D_3 = 43,25$ [мм] – наружный диаметр экрана цилиндрической магнитной муфты;

$l_3 = 40$ [мм] реактивная длина магнита вдоль оси вращения;

$\rho = 1380 \cdot 10^{-9}$ [Ом·м] удельное электрическое сопротивление материала экрана (титанового сплава ВТ5-1);

$\delta_3 = 2,5$ мм – толщина экрана.

Тормозной момент в токопроводящем экране при $n = \frac{1000 \text{ об}}{\text{мин}} = 16,7 \text{ об/с}$

$$M_3 = K_3 \cdot n = 0,0069 \cdot 16,7 = 0,115 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

1.7.2 Расчет момента инерции муфты

Момент инерции толстостенного цилиндра относительно оси цилиндра:

$$J = \frac{\rho \cdot (D^4 - d^4) \cdot l}{10},$$

где

$\rho = 7900 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность стали коррозионностойкой 12x18H10T (материал облицовки полумуфты), $\text{кг}/\text{м}^3$;

D - наружный диаметр;

d - внутренний диаметр;

l - длина в осевом направлении, м ;

Вычислим моменты инерции муфты:

$J_{m1} = 0,0065 \text{ кг}/\text{м}^3$ - момент инерции ведущей полумуфты ;

$J_{m2} = 0,00129 \text{ кг}/\text{м}^3$ - момент инерции ведомой полумуфты.

Рассчитаем моменты инерции ведущей и ведомой частей:

$$J_1 = J_p + J_{m1} = 0,0637 + 0,0065 = 0,0702 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J_2 = J_{\text{пр.м}} + J_{m2} + J_{\text{гв}} = 0,00616 + 0,001 + 0,00752 = 0,0149 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Теперь известны все параметры для моделирования движителя с магнитной муфтой.

1.8 Математическая модель движителя с магнитной муфтой

Пользуясь уравнениями (1), (2), (3) построим математическую модель движителя с магнитной муфтой (рисунок 20) и переходной процесс при подаче ступенчатого задающего воздействия 120 В (рисунок 21).

$$\begin{cases} J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = M_{\text{дв}} - M_{\text{м}} - \frac{1}{2}M_{\text{э}} \\ J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M_{\text{м}} - \frac{1}{2}M_{\text{э}} - M_{\text{в}} \end{cases} \quad (3)$$

$$M_{\text{э}} = K_{\text{э}} \cdot n$$

где,

$J_1 = 0,0702 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ – момент инерции ведущей части;

$J_2 = 0,0149 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ – момент инерции ведомой части;

$K_{\text{э}} = 0,0069 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{об}/\text{с}}$ – тормозящий коэффициент экрана.

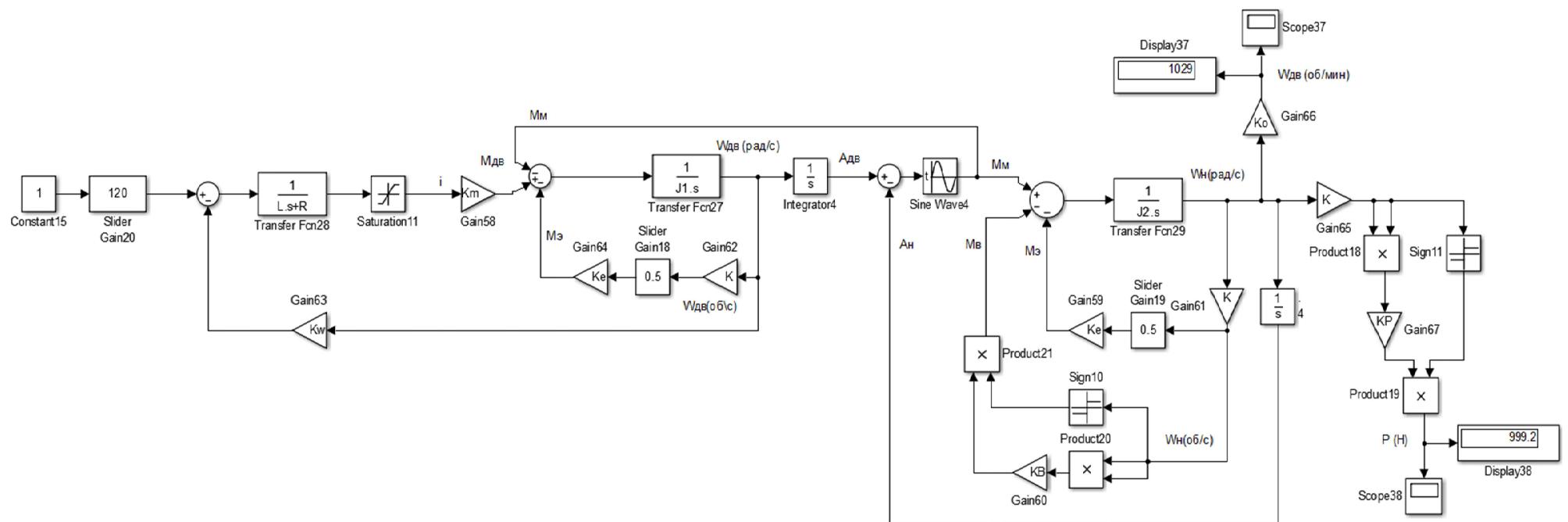


Рисунок 4 – Структурная схема нелинейной модели движителя с магнитной муфтой

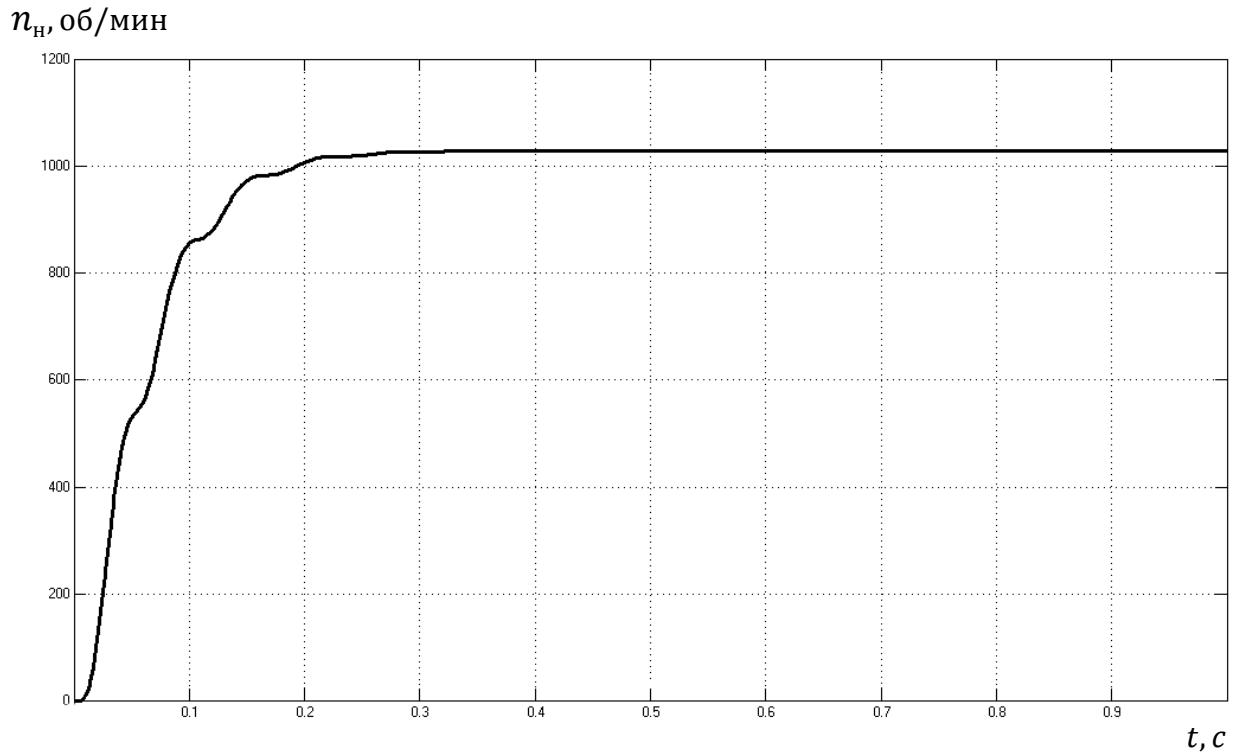


Рисунок 21 – Переходной процесс $n_h(t)$

двигателя с магнитной муфтой в ходовом режиме

На графике переходного процесса (рисунок 21) наблюдаем установившийся процесс, получается, что магнитная муфта выдерживает нагрузку от винта. Незначительное колебание при переходном процессе возникает из-за влияния магнитной муфты.

Проверим магнитную муфту в швартовном режиме при большей вентиляторной нагрузке ($M_{Bmax} = 55,24 \text{ Н} \cdot \text{м}$). Для этого поменяем значение вентиляторного коэффициента на $K_{Bш} = K_{2max} \cdot \rho \cdot D^5 = 0,19926$.

На рисунке 22 изображен переходной процесс в швартовном режиме, на котором также наблюдается установившийся процесс, следовательно, момент магнитной муфты подобран с надежным запасом.

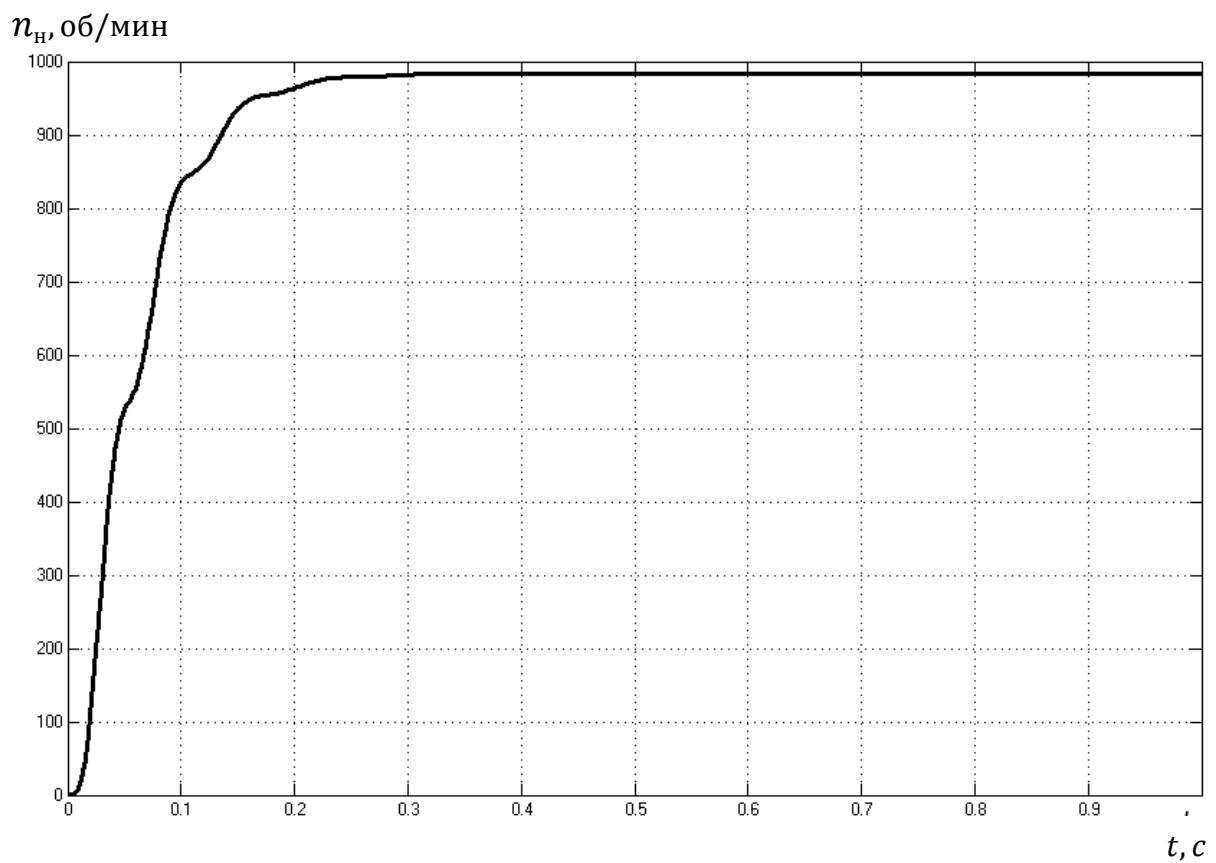


Рисунок 22 – Переходной процесс $n_h(t)$ движителя с магнитной муфтой
в швартовном режиме

1.9 Математическая модель ВМА

Построим структурную схему неизменяемой части с учётом всех особенностей системы управления (рисунок 23). Она состоит из контроллера, усилителя мощности, двигателя, магнитной муфты, датчика скорости, гребного винта.

Обычно датчик угла устанавливается на вал двигателя, потому что он используется как ДПР и датчик скорости, как описывалось ранее (п. 1.4.2).

Он генерирует импульсы (TTL) для последующей их обработки на контроллере, где рассчитывается скорость. Получается, что замыкание скоростного контура происходит в цифровой части, поэтому $K_{DC} = 1$.

Усилитель мощности служит, как ЦАП между контроллером и двигателем. Роль усилителя мощности выполняет трехфазный мостовой инвертор, коэффициент усиления которого K_{yM} будет равен:

$$K_{yM} = \frac{U}{n_{\text{упр}}} = \frac{120\text{В}}{1000\text{об/мин}} = 0,12 \text{ В} \cdot \text{об/мин}$$

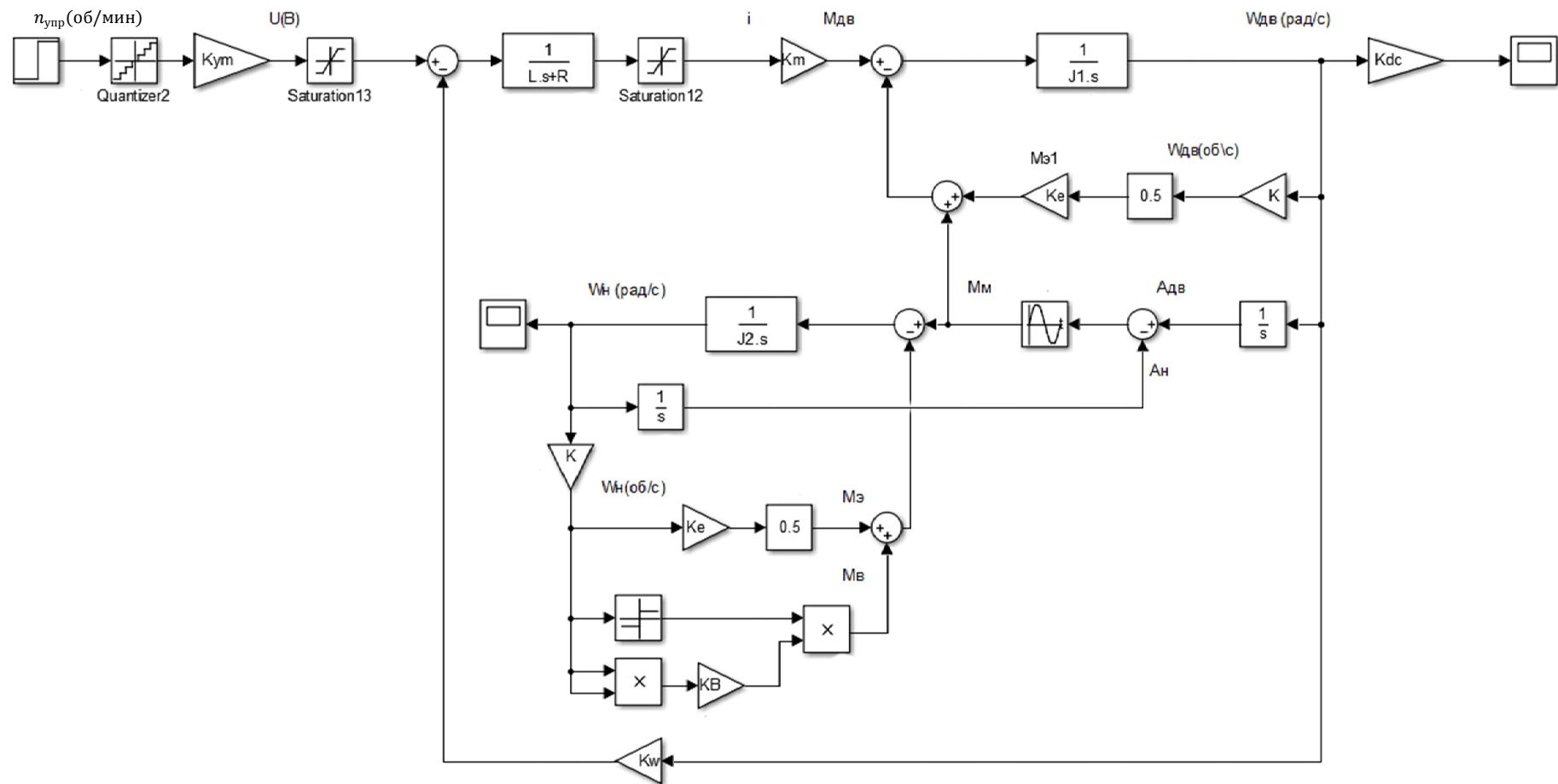


Рисунок 23 – Структурная схема нелинейной модели ВМА

1.9.1 Линеаризация математической модели ВМА

Для удобства исследования характеристик полученной математической модели (рисунок 23), выполним линеаризацию всех нелинейностей, входящих в неё.

Заменим нелинейности вида $y=\omega_n^2 \cdot \text{sign}(\omega_n)$ касательной в полном диапазоне скоростей $\omega_n = \pm 16,7 \text{ рад/с}$. Таким образом, на месте нелинейностей вида $y=\omega_n^2 \cdot \text{sign}(\omega_n)$ получаем $y=K_{L1} \cdot \omega_n$, где $K_{L1}=16,7$.

Нелинейности, соответствующие магнитной муфте, имеют синусоидальную зависимость момента магнитной муфты от φ :

$$M_m = M_{\max} \cdot \sin\left(\frac{\varphi N}{2}\right).$$

При малых углах φ синусоидальная зависимость заменяется линейной составляющей:

$$M_m = M_{\max} \cdot \sin\left(\frac{\varphi N}{2}\right) = M_{\max} \frac{\varphi N}{2} = K_{L2} \cdot \varphi,$$

где

$$K_{L2} = M_{\max} \frac{N}{2} = 57 \cdot 5 = 114$$

Нелинейность в блоке Saturation, которая ограничивает пусковой ток, не учитываем. Во-первых, потому что ограничение по току вводилось для защиты электроник двигателя. Во-вторых, ограничение тока влияет на разрыв магнитной муфты, а в линейной модели срыва не может быть, следовательно, пусковой ток не помешает работе линейной модели. И основное влияние ограничение тока оказывает на время переходного процесса, но данное допущение проверим при сравнении линейной и нелинейной модели.

Нелинейность типа Saturation, которая ограничивает входное напряжение двигателя не учитываем, предполагая, что напряжение питания двигателя не выйдет за пределы ограничения.

Нелинейности типа Quantizer аппроксимируем прямыми с единичным наклоном. Предполагаем, что шаг дискретизации мал, а частота дискретизации

системы достаточно велика, чтобы влияние нелинейностей, связанных с дискретной реализацией системы управления, оказалось незначительным.

Структурная схема линейной модели ВМА представлена на рисунке 24.

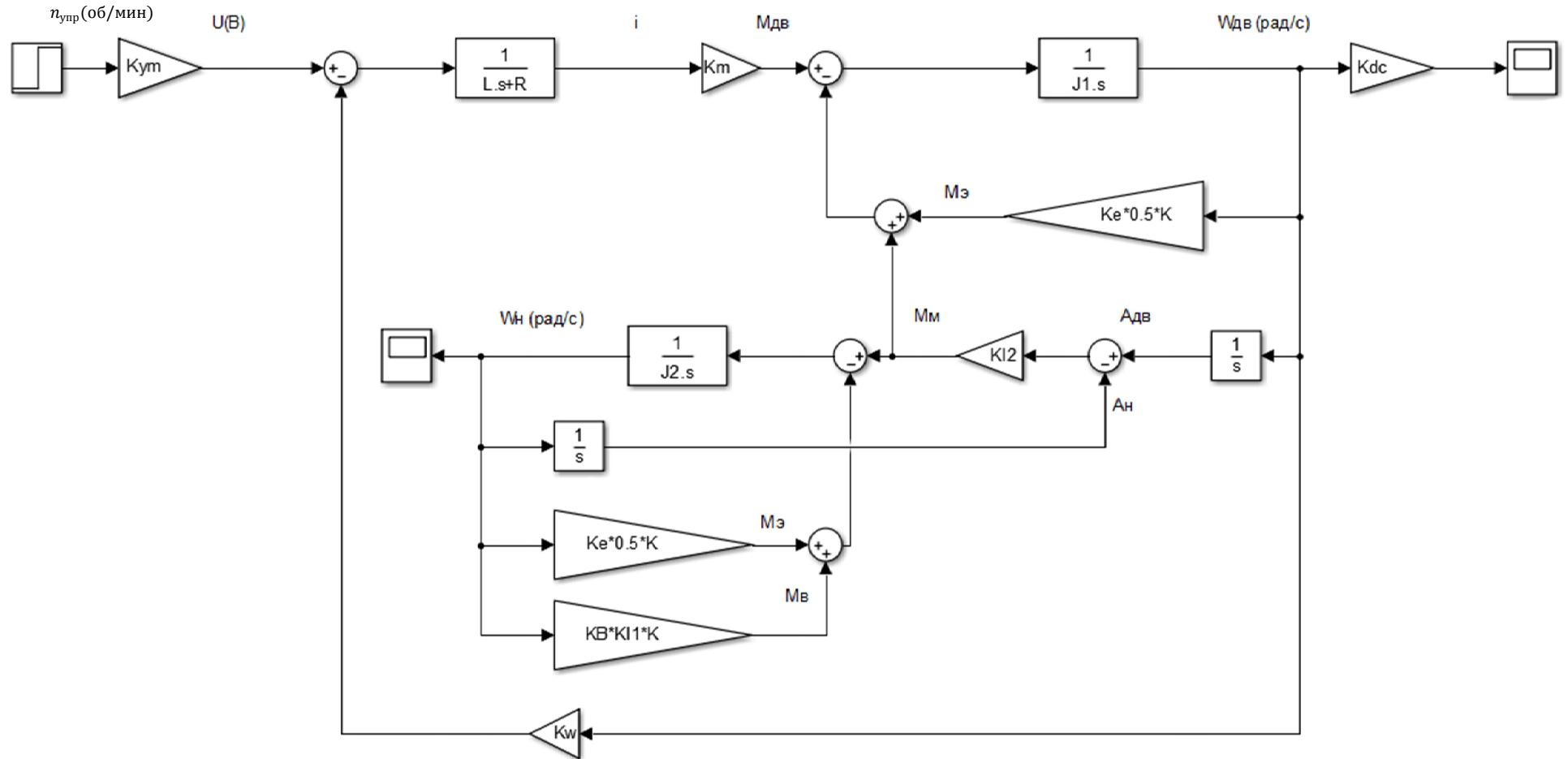


Рисунок 24 – Структурная схема линейной модели ВМА

Чтобы убедиться в правильности построения линейной модели, оценим переходные процессы $n_{\text{дв}}(t)$ (рисунки 25), $n_h(t)$ (рисунки 26) для линейной и нелинейной модели ВМА при сигналах управления $n_{\text{упр}} = 1000$ об/мин.

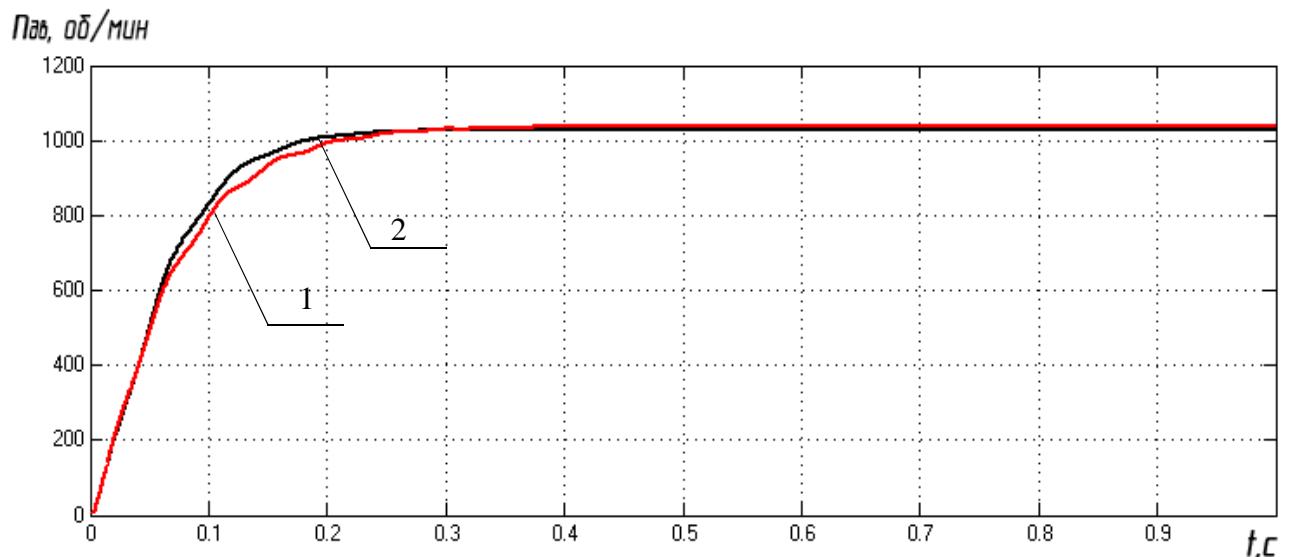


Рисунок 25 – Переходной процесс $n_{\text{дв}}(t)$ при отработке задающего сигнала $n_{\text{упр}} = 1000$ об/мин линейной (1) и нелинейной (2) модели ВМА

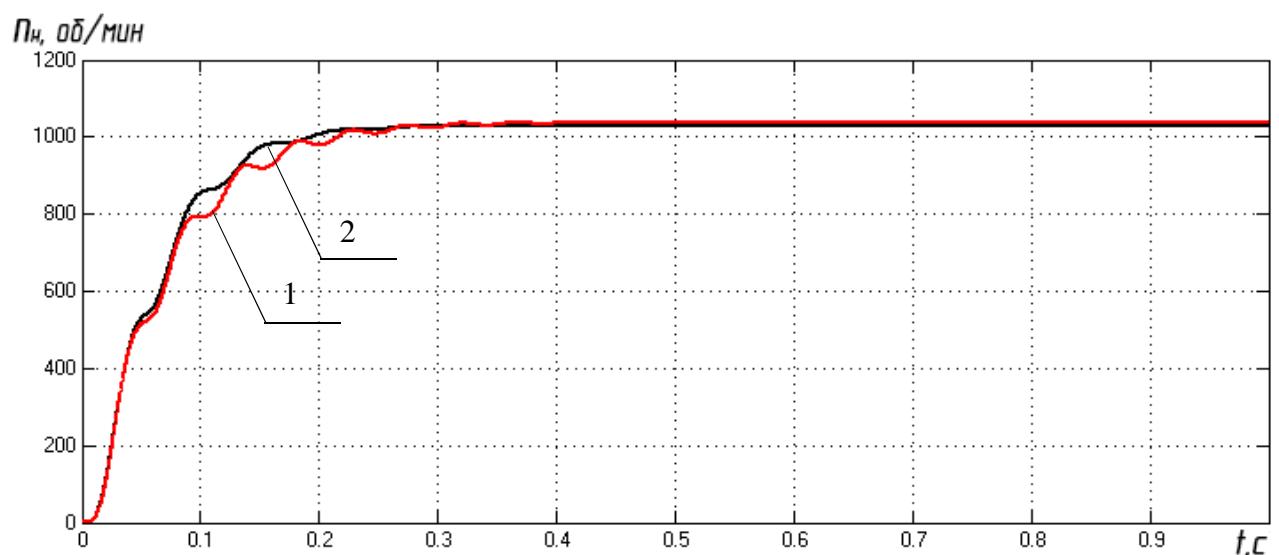


Рисунок 26 – Переходной процесс $n_h(t)$ при отработке задающего сигнала $n_{\text{упр}} = 1000$ об/мин линейной (1) и нелинейной (2) модели ВМА

Анализируя рисунки 25,26 приходим к выводу, что линеаризованная математическая модель ВМА в достаточной степени соответствует полной нелинейной модели.

Найдем передаточную функцию неизменяемой части при $K_{L1}=16,7$.

Путем структурных преобразований, получим:

$$W_{\text{неизм}}(p) = \frac{n_{\text{дв}}(p)}{n_{\text{упр}}(p)} = \frac{k \cdot (T_1 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1)}{T_3 \cdot p^4 + T_4 \cdot p^3 + T_5 \cdot p^2 + T_6 \cdot p + 1}$$

где, $k=1.037$;

$$T_1 = 7,017 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

$$T_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$T_3 = 3,51 \cdot 10^{-7} \text{ с};$$

$$T_4 = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

$$T_5 = 7,8 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

$$\mathbf{T_6 = 0,816 \text{ с.}}$$

Проверим правильность выполненных преобразований. Сравним переходные процессы линейной системы и полученной передаточной функции неизменяемой части.

На рисунке 27 видно, что переходные процессы совпадают, что позволяет сделать заключение о том, что передаточная функция неизменяемой части системы была получена верно.

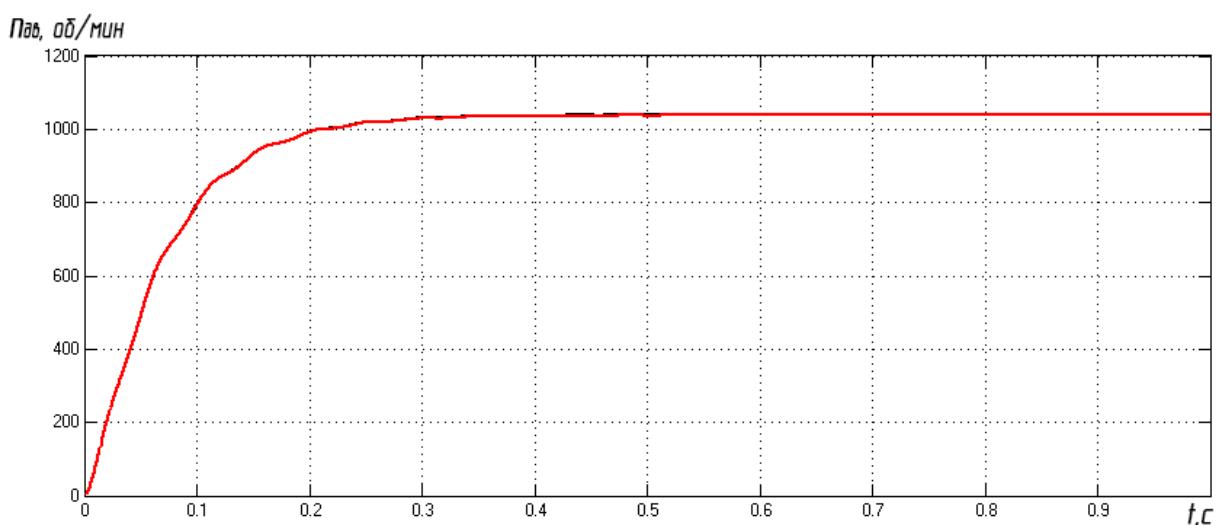


Рисунок 27 – Переходной процесс по $n_{\text{дв}}(t)$
линейной модели и преобразованной модели при $K_{L1}=16,7$

Рассмотрим математическую модель на скоростях близких к нулю. Для этого примем $K_{L1}=0$.

Переходные процессы $n_{\text{дв}}(t)$ и $n_{\text{н}}(t)$ при отработке сигнала управления $n_{\text{упр}} = 1 \text{ об/мин}$ линейной и нелинейной модели ВМА, представлены на рисунках 28 и 29, соответственно.

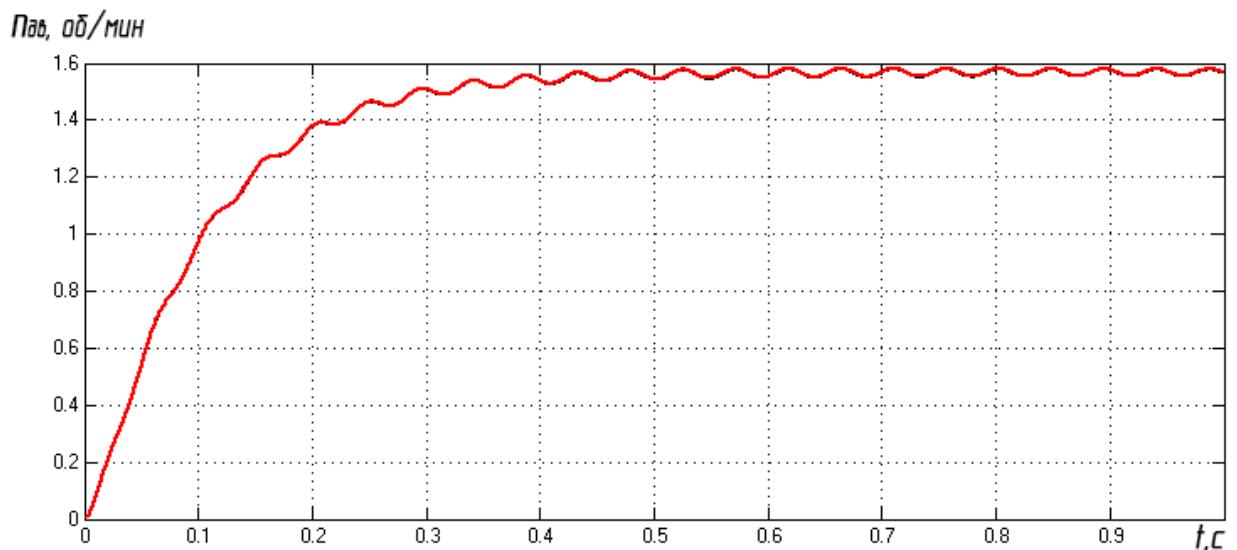


Рисунок 28 – Переходной процесс $n_{\text{дв}}(t)$ при отработке сигнала $n_{\text{вpp}} = 1 \text{ об/мин}$ линейной и нелинейной модели ВМА

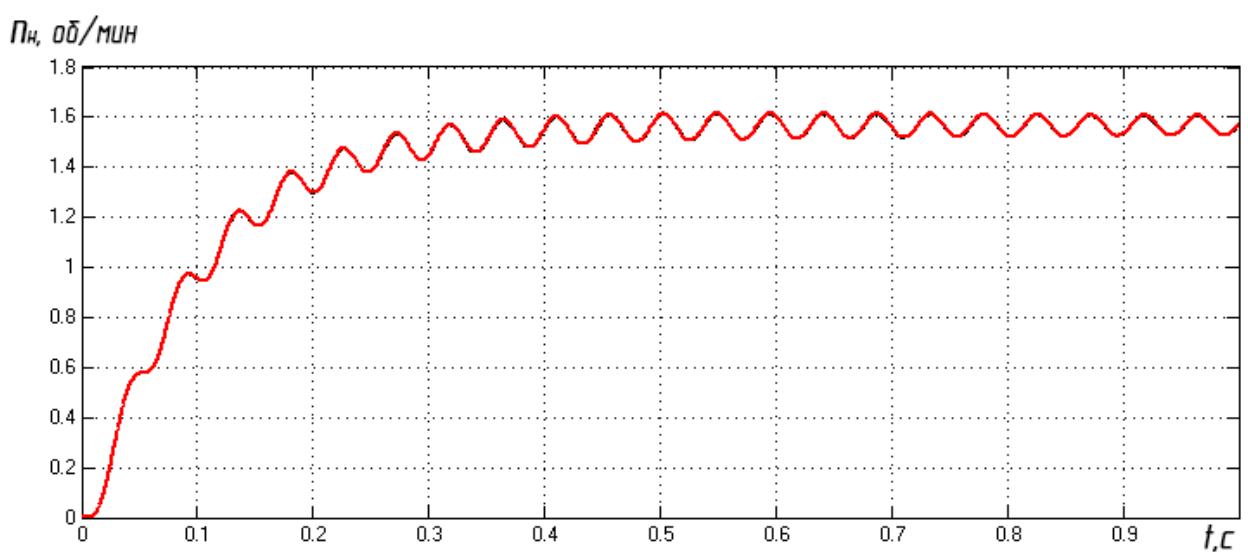


Рисунок 29 – Переходной процесс $n_h(t)$ при отработке сигнала $n_{\text{упр}} = 1 \text{ об/мин}$ линейной и нелинейной модели ВМА

По результатам моделирования можно заключить, что линеаризованная математическая модель соответствует нелинейной модели ВМА.

На рисунках 28,29 наблюдаем колебательный переходной процесс при отработке малого сигнала. Колебания происходят из-за не скомпенсированного динамического момента. В момент пуска ведущая полумуфта поворачивается на определенный угол, а ведомая стоит на месте. Под действием магнитных сил возникает момент муфты, и ведомая полумуфта завлекается за ведущей, появляется дополнительная нагрузка, уменьшающая динамический момент двигателя. Ускорение ведущей части уменьшается, ведомая полумуфта начинает догонять ведущую. В результате уменьшается нагрузка на ведущую полумуфту, двигатель начинает ускоряться снова, что приводит к колебательному процессу[5]. На рисунке 30 показан колебательный переходной процесс суммарного момента ведущей полумуфты.

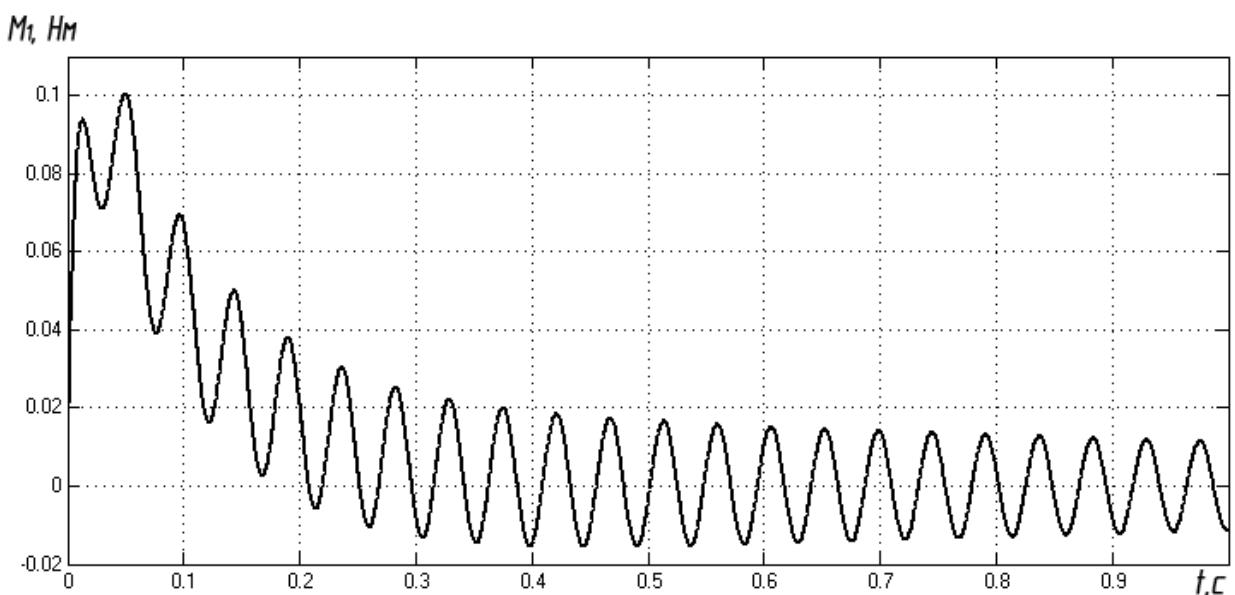


Рисунок 30 – Переходной процесс $M_1(t)$ при отработке сигнала
 $n_{\text{упр}} = 1 \text{ об/мин}$ нелинейной модели ВМА

Путем структурных преобразований, получим передаточную функцию неизменяемой части при $K_{L1}=0$.

$$W_{\text{неизм}}(p) = \frac{n_{\text{дв}}(p)}{n_{\text{упр}}} = \frac{k \cdot (T_1 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1)}{T_3 \cdot p^4 + T_4 \cdot p^3 + T_5 \cdot p^2 + T_6 \cdot p + 1}$$

где, $k=2,609$;

$$T_1 = 7,017 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

$$T_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$T_3 = 3,51 \cdot 10^{-7} \text{ с};$$

$$T_4 = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

$$T_5 = 6,9 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

$$T_6 = 0,77 \text{ с}$$

Сравним переходные процессы линейной системы и полученной передаточной функции неизменяемой части на рисунке 31. Переходные процессы совпадают, следовательно, преобразования были выполнены правильно.



линейной модели (1) и преобразованной (2) модели при $K_{L1}=0$

1.10 Оценка качества переходного процесса замкнутой системы

Проведем оценку качества переходного процесса замкнутой системы по контуру скорости вращения. Определим степень близости замкнутой системы к границе устойчивости, используя частотную характеристику разомкнутой цепи (рисунок 32).

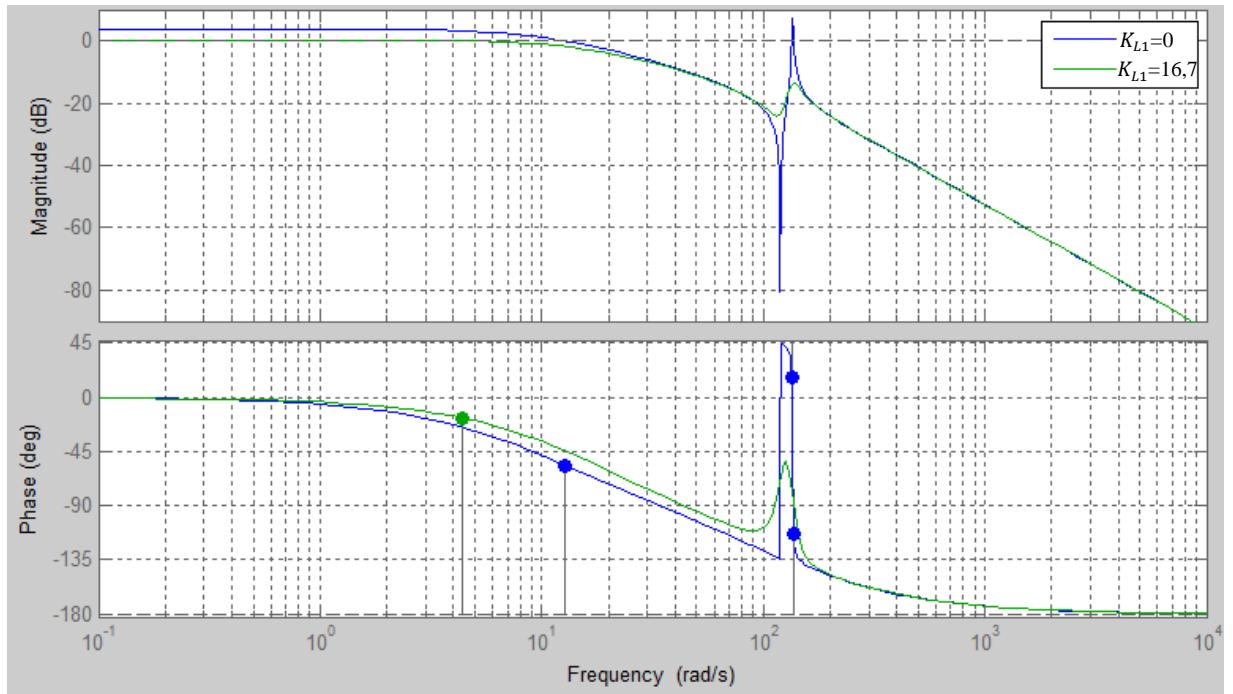


Рисунок 32 – ЛАЧХ и ФЧХ разомкнутой нескорректированной системы

На рисунке 32 обозначены:

- зеленым цветом – характеристики при $K_{L1}=16,7$;
- синим цветом – характеристики при $K_{L1}=0$.

По ЛАЧХ и ФЧХ можно заключить, что $K_{L1}=0$ представляет собой наихудший с точки зрения устойчивости случай, так как при одних и тех же частотах имеет больший коэффициент усиления и больший фазовый сдвиг, чем в случае $K_{L1}=16,7$. Так же для случая $K_{L1}=0$ система имеет значительный резонансный пик, который влияет на плавность переходного процесса.

Уменьшение влияния резонансного пика может быть достигнуто за счет динамического загружения.

1.11 Синтез динамически загруженной системы

Под динамическим загружением системы с упругими деформациями будем понимать уменьшение частоты среза ЛАЧХ разомкнутой системы управления (сужение полосы пропускания системы), без уменьшения коэффициента усиления разомкнутой системы, таким образом, повышая запас устойчивости системы.

Синтез динамически загруженной системы осуществляется введением последовательного корректирующего устройства (рисунок 33).

$$W_{\text{пку}}(p) = \frac{\tau \cdot p + 1}{T_k \cdot p + 1}$$

где T и T_k находятся с помощью построений (рисунок 34).

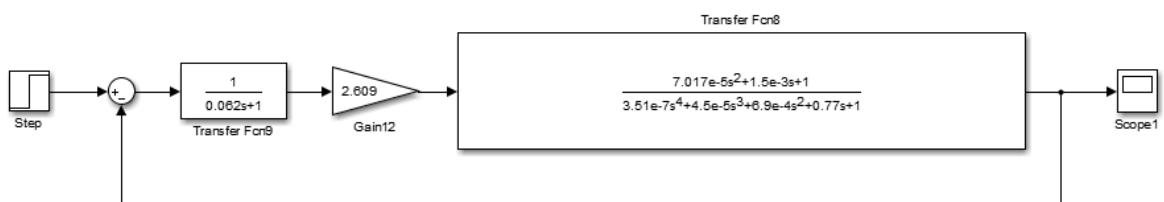


Рисунок 5 – Структурная схема контура скорости

Система управления является устойчивой, поэтому воспользуемся динамичным загружением так, чтобы оно не влияло на полосу пропускания системы и опускало резонансный пик ниже $K=1$. Получается, что для синтеза системы будем использовать только апериодическое звено.

Так как нет требований по точности системы, то по виду ЛАЧХ разомкнутой системы, определим постоянную времени последовательного корректирующего устройства (T_k) (рисунок 34).

Введем коррекцию на частоте $\omega_k = 16,1$ рад/с, обозначенной на ЛАЧХ (рисунок). Тогда постоянная времени последовательного корректирующего устройства будет равна $T_k = \frac{1}{\omega_k} = 0,062$ с.

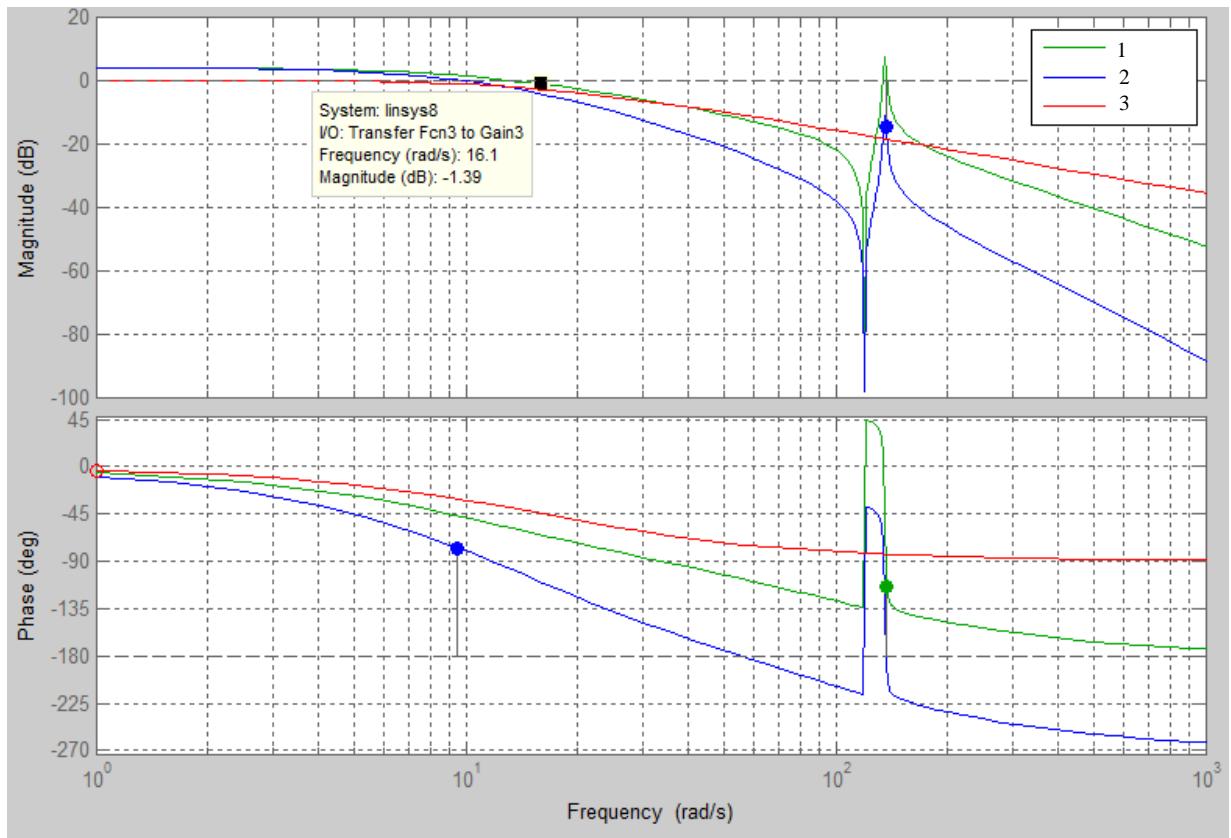


Рисунок 34 – ЛАЧХ и ФЧХ разомкнутой нескорректированной системы (1), разомкнутой скорректированной системы (3) и корректирующего устройства (2)

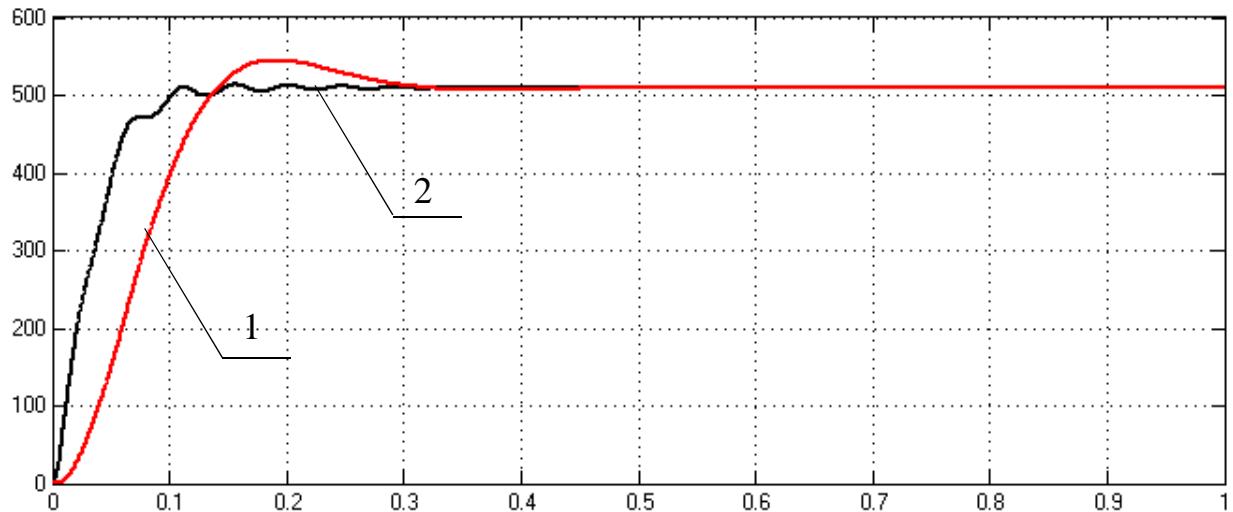


Рисунок 35 – Переходной процесс $n_{dv}(t)$ контура скорости с коррекцией (1) и без (2) при отработке сигнала управления $n_{y\text{упр}} = 1$ об/мин

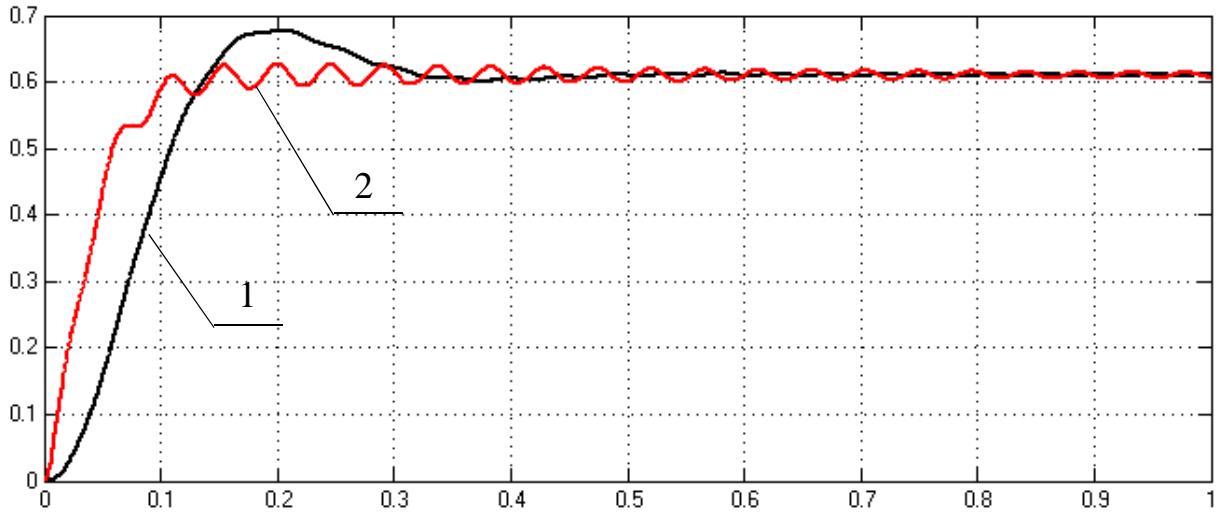


Рисунок 36 – Переходной процесс $n_{\text{дв}}(t)$ контура скорости с коррекцией (1) и без (2) при отработке сигнала управления $n_{\text{упр}} = 1000 \text{ об/мин}$

На рисунках 35, 36 показаны переходные процессы контура скорости с коррекцией и без для случаев $K_{L1}=0, K_{L1}=16,7$. Можно сделать вывод, что введение последовательного корректирующего устройства сделало переходной процесс плавным без колебаний, но с небольшим перерегулированием.

Также на рисунках 35, 36 наблюдается статическая ошибка системы. Рассчитаем статическую ошибку при постоянной величине управляющего воздействия: $g(t) = \text{const} = g_0 = 1000 \text{ об/мин}$,

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{yc}} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \Phi_\varepsilon(s) G(s) s = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + W(s)} g_0 = \frac{g_0}{1 + k} = \\ &= \frac{1000}{2.037} = 490.92 \text{ об/мин}\end{aligned}$$

При обработке сигнала управления $n_{\text{упр}} = 1000 \text{ об/мин}$, установившая скорость $n_{\text{уст}} = 509.2 \text{ об/мин}$ (рисунок 35), тогда статическая ошибка будет равна $\varepsilon_{\text{yc}} = n_{\text{упр}} - n_{\text{уст}} = 490.8 \text{ об/мин}$, что соответствует подсчитанной ошибке. Следовательно, расчет произведен правильно.

Теперь сравним переходные процессы линейной и нелинейной моделей контура скорости с коррекцией.

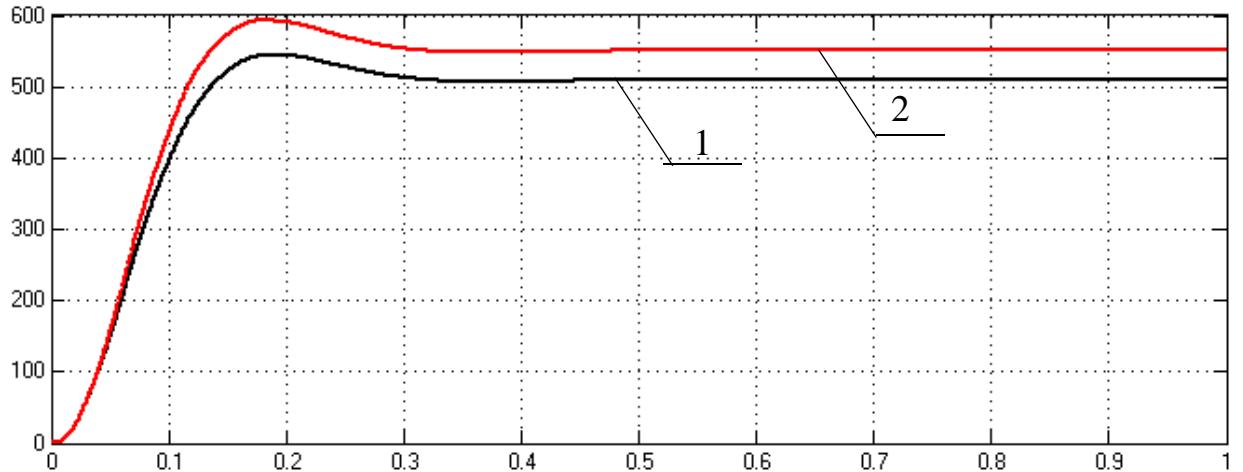


Рисунок 37– Переходной процесс $n_{дв}(t)$ контура скорости линейной (1) и нелинейной (2) при обработке сигнала управления $n_{упр} = 1000$ об/мин

Из-за грубой линеаризации переходной процесс нелинейной модели имеет меньшую статическую ошибку, чем линейной (рисунок 37).

Рассмотрим математическую модель с введением корректирующего устройства, но без замыкания обратной связи по скорости. На рисунке 38 представлено сравнение переходных процессов с ОС и без, при сигнале управления $n_{упр} = 1000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

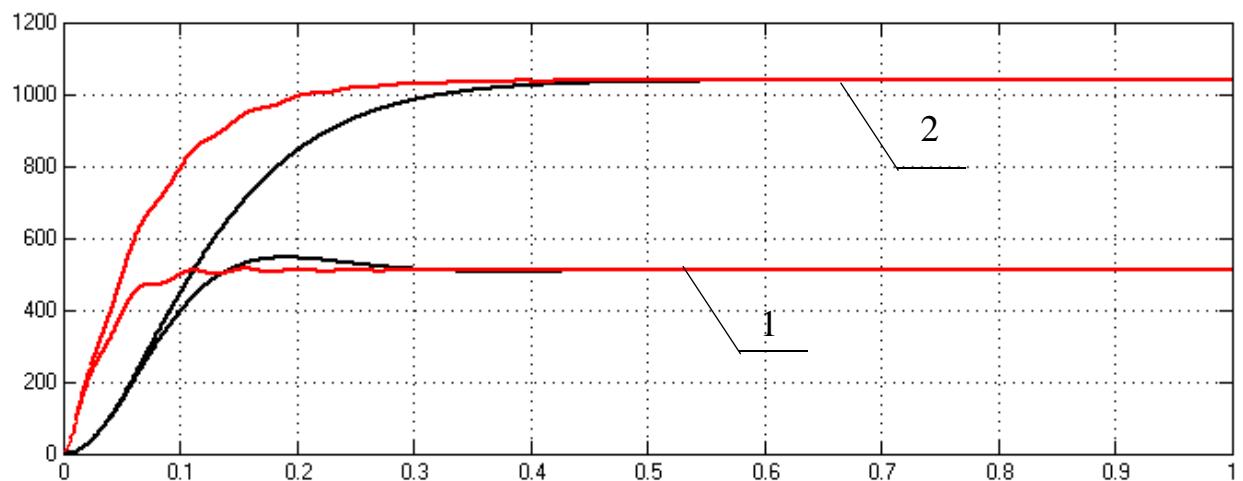


Рисунок 38 – Переходной процесс $n_{дв}(t)$ с коррекцией с ОС (1) и без (2) при обработке сигнала управления $n_{упр} = 1000$ об/мин,

Можно сделать вывод, что ведение апериодического звена сделало переходные процессы плавными (рисунке 38), а замыкание обратной связи по скорости вносит небольшое перерегулирование. Проверим необходимость введения ОС, для этого построим регулировочные характеристики упора от задающей скорости с ОС по скорости и без.

1.12 Построение регулировочной характеристики ВМА

На рисунке 39 изображены зависимости выходной скорости от задающей, для моделей с ОС и без ОС по скорости.

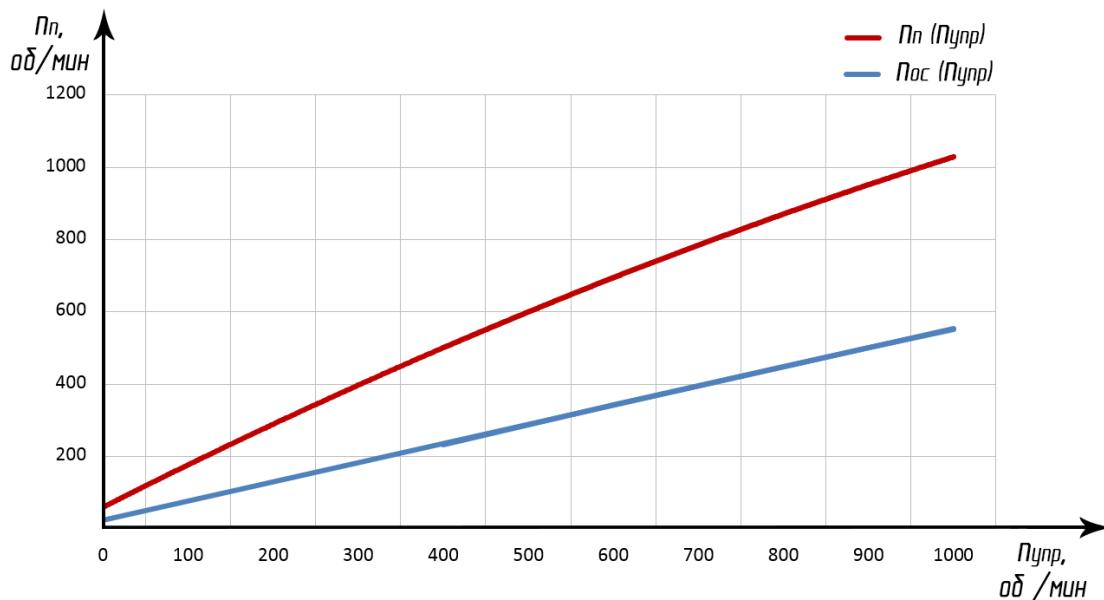


Рисунок 39 – Регулировочная характеристика ВМА по скорости

Регулировочная характеристика по скорости без ОС очень близка к линейной зависимости.

Теперь рассмотрим регулировочную характеристику по упору ВМА (рисунок 40).

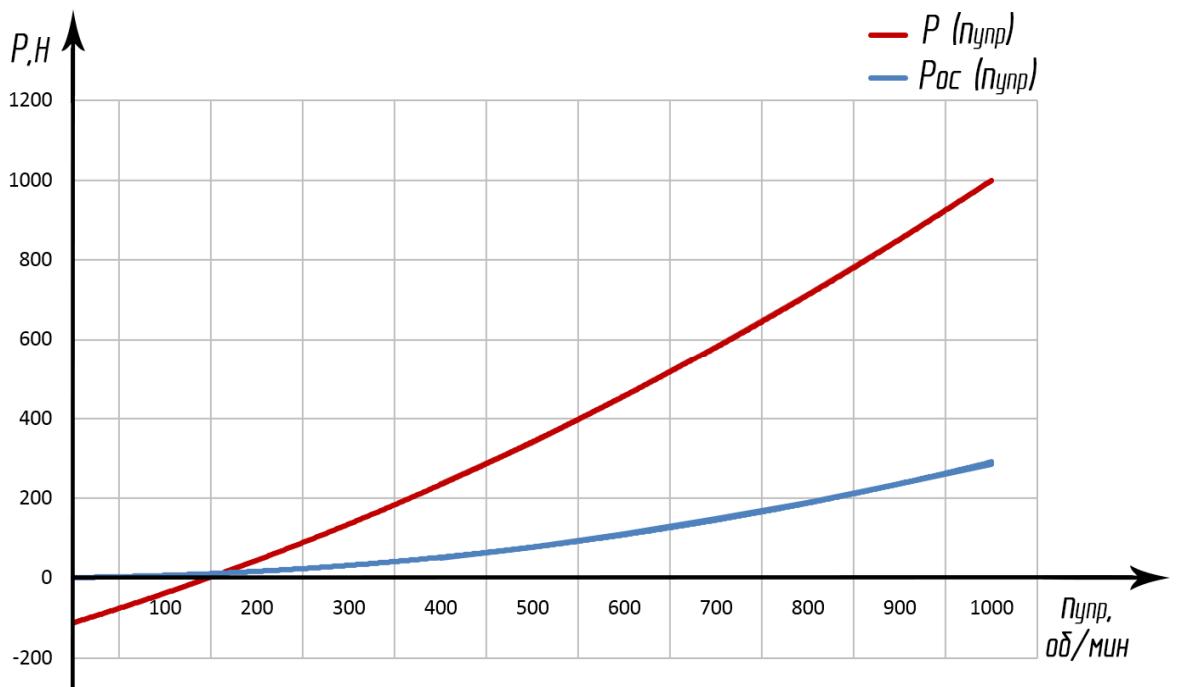


Рисунок 40 – Регулировочная характеристика ВМА по упору для модели без ОС по скорости