Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 3
1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА 4
1.1 История создания бассейнов. 4
1.2 Виды бассейнов 6
1.3 Основные этапы очистки воды 8
1.4 Химическая очистка воды. 9
1.4.1 Хлорирование воды 10
1.4.2 Бромирование воды. 11
1.4.3 Обеззараживание воды с помощью активного кислорода. 12
1.4.5 Озонирование воды. 13
1.5 Механическая очистка воды 15
2. ВЫБОР ПРИНЦИПОВ УПРАВЛЕНИЯ И СИЛОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА 20
2.1 Расчет объема бассейна и требуемой производительности насоса 20
2.2 Выбор насосного агрегата. 21
2. 3 Проверка двигателя 23
2.3.1 Расчет параметров схемы замещения. 24
2.3.2 Расчет и посторенние электромеханической характеристики электродвигателя 30
2.3.3 Расчет и построение механической характеристики электродвигателя 32
2. 4 Выбор преобразователя частоты. 33
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ. 36
3.1 Модель АД в неподвижной системе координат 36
3.2 Модель АД во вращающейся системе координат 45
4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ. 49
4.1 Оптимизация контуров регулирования. 51
4.1.1 Контур управления составляющей вектора тока $I_{sx.}$ 51
4.1.2 Контур управления составляющей вектора тока $I_{sy.}$ 56

4.1.3 Контур потокосцепления 59
4.1.4 Контур скорости..... 64
4.2 Общая линейная модель во вращающейся системе координат. 69
4.3 Общая линейная модель в неподвижной системе координат 71
5. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА 74
5.1 Ограничение максимального напряжения. 75
5.2 Ограничение максимального тока..... 76
5.3 Создание нелинейной модели со ступенчатым набросом нагрузки..... 77
5.4 Создание нелинейной модели с насосной нагрузкой..... 80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 86
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 88

ВВЕДЕНИЕ

В наше время энергосбережение стало одним из основных приоритетных направлений технической политики развитых государств. Энергосбережение сводится к снижению бесполезных потерь.

Электропривод потребляет около 60% всей вырабатываемой энергии, следовательно основной эффект энергосбережения может быть получен как раз из этой области. Одни из основных потребителей энергии в электроприводе являются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, для которых одним из направления энергосбережения является переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому. Из основных решений используемых для энергосбережения одно из наиболее эффективных и быстроокупаемых, требующих небольших финансовых вложений – это внедрение высокотехнологичной энергосберегающей техники – частотно-регулируемых асинхронных приводов. Асинхронные двигатели наиболее часто применяются в промышленности и на транспорте из-за своей простоты и надёжности. Однако, эффективное управление ими представляет собой довольно сложную задачу и требует создания специальных систем управления.

Для большинства массовых применений приводов (насосы, вентиляторы, конвейеры, компрессоры и т.д.) требуется относительно небольшой диапазон регулирования скорости (до 1:10, 1:20) и относительно низкое быстродействие.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка системы управления фильтрационного насоса бассейна на базе ПЧ, удовлетворяющего техническим условиям и требованиям.

1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

1.1 История создания бассейнов.

Хотите собственный кусочек моря или чистейшее горное озеро у себя во дворе? В наше время это не составляет особой проблемы. Лазурная гладь воды, поблескивающая в солнечных лучах, на заднем дворике или в люминесценции огней цокольного этажа коттеджа, подарит вам свою прохладу жарким летом, и разбавит морозные будни холодной зимой. Бассейн не такая уж и редкость в современном мире. Но мало кто знает историю возникновения этого великолепного, крайне полезного сооружения, которое может принести своему владельцу огромное наслаждение и пользу.

К сожалению, а может быть и к счастью, но современность мало, что придумала сама. Многое является достижением прошлых эпох, и основные изобретения, как науки и культуры, так и досуга пришли к нам из классической Греции, величественного Рима и загадочного Востока. Бассейн тоже гость из тех времен. Древние Греки, придававшие своему здоровью и форме значение большее, чем кто-либо, были отцами этого построения. В языковую практику греков был введен термин, который характеризовал человека некультурного следующим образом - «не умеет ни читать, ни плавать». Они популяризовали плавание и начали возводить плавательные сооружения на территориях гимназий, где тренировали атлетов и войнов.

Жизнь бассейна была продолжена в рамках Древнеримской культуры. В результате римских завоеваний разного рода богатства, достижения мысли и инженерии потекли в Рим и италийские города. Всем известна любовь римлян к телесному, их страсть попариться в банях (термах) для продления молодости, красоты и здоровья. Если в Греции бассейн отвечал общественным требованиям, то в Риме он приобрел индивидуальность, а именно, бассейн стал считаться предметом роскоши и критерием социального статуса владельца. Но про общественную пользу бассейна не забыли. Наумахии были одним из видов игрищ, импровизировавших морские сражения гладиаторов. Так же бассейны использовались для красочных

представлений, таковым, например, являлся бассейн в Таормине, развалины которого до сих пор удивляют взор любознательного туриста. Вода подавалась из городского водопровода, отвечавшего последним требованиям техники того времени, а его размер поражает и по сей день – диаметр сооружения составляет 122 метра, а глубина 5.

В эпоху Средневековья вместе со всеми прежними достижениями прежних лет, бассейн тоже был предан забвению. Крестоносцы, побывав за стенами сказочных дворцов шейхов, предприняли попытки реанимировать практику омовения, но Святая Церковь присекла это греховное занятие, посчитав его крайне непристойным и богохульным.

В 19 веке это изобретение опять занимает свои позиции. После возобновления Олимпийских игр в 1869 году, плавание возводится в ранг спорта, а бассейн переходит из частных рук в общественное пользование. Огромными темпами происходит строительство плавательных сооружений, в том числе и крытых бассейнов.

Игнорируя протесты Берлинского общества дерматологов, по инициативе и разработке епископа Кнайпа и отцов гимнастики Яна и Мюллера, в 1877 году в Бремене появляется первый в мире общественный плавательный бассейн. Всему миру известно, что всё, что ни делается в Германии, делается с присущей для этой страны серьезностью и рационализмом. Так же были заложены основы проектирования бассейна. Он отвечал всем возможным требованиям гигиены, практиковал доступные тому времени способы обеззараживания воды, а так же, систему гидроизоляции и водоочистки. Если изначально плаванию обучались преимущественно офицеры военных училищ и кадетских корпусов, то теперь это стало доступно всем желающим.

Это событие послужило толчком для начала массового строительства бассейнов по всему миру. Но всё же не утихали споры между дерматологами и желающими заниматься плаванием. И был найден компромисс. Банно-плавательный комплекс «Goseriede» в Ганновере, строительство которого

заняло 15 лет (1890-1905) стал той золотой серединой, тем долгожданным решением, который удовлетворял требования обеих сторон. Для удобства посетителей план проекта предусматривал переход из центрально помещения в другие, прилегающие к нему здания. Интерьер был украшен различными напольными и настенными мозаиками, стены и пол облицованы белыми плитками, зал перекрыт железными сводами. Всё здание соответствовало надлежащим санитарно-гигиеническим и техническим нормам: новейшие фильтры, методы очистки воды, ее подогрев, душевые и банные помещения, освещение павильонов – придраться было не к чему. Эти принципы, созданные в Германии, используются и по сей день.

Истина рождается в споре. Немало лет прошло с момента рождения идеи о создании бассейна. Изменения переживали как функции бассейна, так и его популярность. «Да, это я. У меня всё хорошо, купаюсь в бассейне, пью джус, оранджат, прямо не выходя из бассейна. У меня много друзей, машина, личный шофер..» - из этих слов, сказанных хвастливым Кешей из известного всех мультфильма, становится понятно, что, начиная с 60х годов XX века, бассейн - это не просто место, где можно поплавать, но это особый символ dolce vita, символ состоятельности его владельца, роскоши, престижный способ оформления культурного пространства.

1.2 Виды бассейнов

Первая категория - стационарные бассейны, под них роют котлован, заливают форму (чашу), из бетона или устанавливают готовую, подводят коммуникации и по технологии делают внутреннюю отделку. Готовые чаши для бассейнов изготавливают из стекловолокна или полипропилена, что дает возможность без труда выбрать размеры и форму будущего бассейна. Достоинствами чаш из полипропилена и стекловолокна являются их герметичность, надежность, большой срок эксплуатации. По сути, это почти готовые бассейны к которым после установки, в определенное место, подсоединяют коммуникации, декорируют и все, бассейн готов. Недостатком

вышеописанных бассейном является невозможность установки в уже построенном помещении, так как у них, сами понимаете, фиксированные размеры. Я не думаю что кто-то будет разбирать пол дома, чтобы установить в нем готовую чашу.

Если Вы хотите стационарный бассейн с бетонной чашей, то Вам необходимо запастись терпением и деньгами, так как это самые трудоемкие и долго строящиеся бассейны, но они солидны и надежны как говорится - на века. Бетонный бассейн можно построить практически в любом месте, ну и конечно внутри помещения. Также, при проектировании, можно выбрать всевозможные формы и размеры, что удовлетворит Ваш вкус.

Вторая категория - каркасные бассейны. Такие бассейны продаются в готовом виде и устанавливаются в нужном для Вас месте. Они состоят из сборного каркаса, водонепроницаемого ПВХ покрытия, которое после установки на каркас и является емкостью для воды. Также, каркасные модели имеют системы фильтрации воды, лесенки для удобства попадания людей в сам бассейн ну и некоторые модели имеют накрытия которые предотвращают засорение. Каркасные бассейны могут быть внушительных размеров. В отличии от стационарных, их можно перемещать в любое удобное для Вас место. При покупке каркасного бассейна, обратите внимание на комплектацию. В комплект хорошего каркасного бассейна должны входить: фильтр для очистки воды, удобная лестница, подстилка для установки бассейна, тент для накрытия бассейна, ну и конечно сам бассейн с инструкцией по монтажу.

Третья категория - надувные бассейны, которые самые мобильные из перечисленных. Как правило они состоят из нескольких надувных колец. Среди надувных бассейнов можно подобрать себе и по размерам, и по высоте бортика, и даже по цвету и форме. Многие модели снабжены насосами, как ручными так и электрическими, для быстрой накачки воздухом. Особой популярностью надувные бассейны пользуются у детей из-за разнообразия

цветов и моделей, а так же из-за небольших размеров, что дает возможность разместить такой бассейн практически в любом месте.

1.3 Основные этапы очистки воды.

Для того, чтобы занятия в плавательном бассейне были комфортными и полезными для здоровья, в любом общественном бассейне проводится комплекс мероприятий по подготовке воды и уходу за ней, который включает:

1) Подогрев воды

Подогрев воды необходим для поддержания комфортной температуры в чаше бассейне. Температура воды в плавательном оздоровительном бассейне составляет 25-28 °С. Воду в небольших бассейнах в СПА зонах и бассейнах с гидромассажем обычно подогревают до 30-34 °С.

2) Обеспечение рециркуляции воды

Рециркуляция необходима для равномерного перемешиванию воды во всех частях бассейна.

3) Механическая очистка воды

Механическая очистка воды - это очистка воды от таких загрязнителей как мусор, пыль, песок, отмершие микроорганизм. Такая очистка осуществляется с помощью специальных фильтров (песочных, мембранных, угольных). Система фильтрации является неотъемлемой частью любого бассейна, благодаря ей вода в бассейне остается чистотой и прозрачной в течении длительного времени.

4) Обеззараживание воды

Обеззараживание (дезинфекция) воды - это уничтожение биологически активных загрязнителей и продуктов жизнедеятельности (микроорганизмы, водоросли, бактерии, вирусы, потожировые выделения). Для обеззараживания воды применяются различные технологии и методы, которые подразделяются по способу воздействия на микроорганизмы на:

А) Реагентные методы. Дезинфекция достигается путем внесения в воду биологически активных химических соединений (хлорирование,

бромирование, озонирование, использование кислородсодержащих реагентов, комбинированных препаратов типа «хлор + кислород» и т.п.);

Б) Безреагентные методы. Обработка воды физическим воздействием (ультрафиолет, ультразвук, электроимпульсы и т.п.);

В) комбинированные методы. Используются различные комбинации реагентных и безреагентных методов.

1.4 Химическая очистка воды.

Итак, воду в бассейне очищают от механических включений, неорганических и органических примесей. Откуда же берутся эти примеси?

Изначально вода, используемая для наполнения бассейна, содержит некоторое количество механических, неорганических и органических примесей, равно как и водопроводная вода. Вода из артезианских скважин содержит много неорганических веществ, некоторые из которых не полезны для человека. Далее, со временем в воде заводятся различные микроорганизмы и водоросли, которые будут выделять в воду продукты жизнедеятельности. На воду постоянно оседает пыль из окружающей среды. Посетители бассейна тоже вносят свой вклад: один человек, даже предварительно приняв душ, заносит в бассейн за занятие до 50 тысяч микроорганизмов. Как мы разобрались, в бассейн могут попасть вредоносные органические и неорганические вещества, которые не только загрязняют воду, но и могут привести к тяжелым заболеваниям. Поэтому существуют определенные санитарные нормы и осуществляется регулярный контроль за состоянием воды в общественных бассейнах.

Рассмотрим подробнее методы обеззараживания (дезинфекции) воды. Для обеззараживания используются различные реагентные и безреагентные методы: хлорирование, озонирование, электролиз, ультрафиолетовое облучение, но наиболее распространенной технологией по-прежнему является хлорирование.

1.4.1 Хлорирование воды

Хлорирование воды основано на добавлении в воду хлорсодержащих веществ, это самый старый, самый распространенный и самый надежный реагентный способ дезинфекции воды. Метод основан на способности свободного хлора и его соединений угнетать ферментные системы микробов, катализирующие окислительно-восстановительные процессы. В России в 99% случаев хоть в какой-то степени хлорируется вода в любом бассейне, даже в бассейне с морской водой, так как хлорирование – самый надежный и доступный способ соблюсти принятые санитарные нормы.

Достоинства метода хлорирования:

1) Надежность и широкий спектр воздействия на микроорганизмы.

Хлор способен разрушать и уничтожать подавляющее большинство известных патогенных микроорганизмов. Хлорирование обрабатывает не только воду, но и поверхности самого бассейна, в отличие от озонирования, электролиза и обработки ультрафиолетом, когда обрабатывается только вода, проходящая непосредственно через прибор обеззараживания, а поверхности бассейна остаются фактором риска;

2) Пролонгированное действие.

Хлор долго сохраняется в активном виде в воде (свободный хлор);

3) Недорогой и доступный способ.

Недостатки метода хлорирования:

1) Хлорированием не уничтожаются спорообразующие микроорганизмы (в отличие например, от озонирования);

2) При поддержании в воде постоянного уровня хлора со временем наблюдается "привыкание" патогенных микробов к этим концентрациям хлора. Для решения этой проблемы применяется периодическая обработка повышенными дозами хлора (хлорный шок);

3) Вводе постоянно образуются токсичные продукты хлорирования (хлороформ, хлорамины), с которыми нужно вести постоянную "борьбу".

В настоящее время рекомендуется сочетать различные системы дезинфекции. Комбинация с хлорированием каких-либо других способов дезинфекции позволяет достичь максимального эффекта обеззараживания без вреда для здоровья.

1.4.2 Бромирование воды.

Бромирование воды – реагентный метод, являющийся альтернативой хлорированию воды в бассейне. Бром, как и хлор является галогеном и сильным окислителем.

Достоинства бромирования:

1) Широкий спектр воздействия на микроорганизмы, бром убивает вирусы, бактерии, грибки, способствует удалению из воды органических примесей. Бром более эффективен в борьбе с водорослями. Бромирование обрабатывает не только воду, но и поверхности бассейна;
2) Обеспечивает оптимальный уровень надежности дезинфекции воды благодаря устойчивости к высоким значениям Рн. Например, при Рн=8,0 эффективность обеззараживающего действия брома составляет 87%, в то время как у хлора - 33%;
3) Бромирование не повышает жесткость воды;
4) Пролонгированное действие;
5) Соединения на основе брома не раздражает кожу и слизистые;
6) Бромные соединения устойчивы к воздействию солнечной радиации;
7) При бромировании в воде не образуются токсичные вещества;
8) Соединения брома не имеют характерного запаха.

Недостатки бромирования:

1) По эффективности бром занимает промежуточную позицию между хлором и активным кислородом. Поэтому в бассейнах с большим объемом воды бром не всегда справляется;
2) Высокая стоимость препаратов брома.

Несмотря на все свои преимущества, из-за дороговизны метод бромирования не получил широкого распространения и применяется для обеззараживания воды в небольших бассейнах и СПА.

1.4.3 Обеззараживание воды с помощью активного кислорода.

Принцип действия метода очистки с помощью активного кислорода: в воду впрыскивается кислородсодержащий реагент, который в воде разлагается, выделяя кислород, который реагирует с биологическими загрязнениями. Одно время этот щадящий метод был очень популярен в Европе и России.

Достоинства дезинфекции кислородсодержащим реагентом:

1) Достаточно эффективно уничтожает вредную микрофлору, живущую в ванне бассейна;
2) Не раздражает слизистую глаз и кожу за счет отсутствия хлораминов;
3) Не образуется вредных побочных продуктов.

Недостатки дезинфекции кислородсодержащим реагентом:

1) Дорого по сравнению с хлорированием;
2) Кислородсодержащий реагент очень быстро разлагается в водной среде. В результате приходится использовать повышенные дозы;
3) Меньшая активность по сравнению с хлорированием, что опять-таки ведет к увеличению дозировки реагента;
4) Передозировка кислородсодержащего реагента (перекись водорода) имеет более неприятным последствиям для здоровья, чем передозировка хлора;
5) Все равно требуется периодическое хлорирование.

Согласно СанПин 2.1.2.1188-03 «Плавательные бассейны. Гигиенические требования к устройству, эксплуатации и качеству воды», вода в бассейне должно соответствовать по качеству воде питьевой. Предельно допустимая концентрация в питьевой воде перекиси водорода (как действующего вещества активного кислорода) составляет 0.1 мг/л, при

применении метода дезинфекции активным кислородом в качестве единственного метода обеззараживания концентрация перекиси превышается.

Как единственно применяемый метод не подходит для больших общественных бассейнов и открытых бассейнов, но вполне эффективен в небольших закрытых частных бассейнах с невысокой нагрузкой. Также метод дезинфекция активным кислородом не подходит для теплых бассейнов с температурой выше 28°С, так как в теплой воде окисление замедляется.

1.4.5 Озонирование воды.

Озон – это газ, являющийся наиболее активной формой кислорода. Озон является одним из наиболее сильных окислителей, уничтожающих бактерии, споры и вирусы. По своей сутиочистка воды озоном эквивалентна многократно ускоренной процедуре природной очистки воды.

Достоинства метода озонирования:

1) Широкий спектр воздействия на микроорганизмы (озон уничтожает фактически все бактерии, вирусы и органические вещества), причем активность озона во много раз выше, чем у кислорода и хлора. Например, патогенные микроорганизмы уничтожаются им в 15-20 раз, а споровые формы бактерий - в 300-600 раз быстрее, чем хлором. Вирус полиомиелита погибает при концентрации озона 0,45 мг/л через 2 минуты, тогда как от хлора вдвое большей концентрации только за 3 часа;

2) Не образуются хлорамины, раздражающие кожу и слизистую глаз;

3) Озон, в отличие от хлора, не оставляет никакого запаха;

4) Обработка озоном делает воду блестящей и придаёт воде голубой оттенок (хлорирование придает зеленоватый оттенок);

5) Передозировка озона не является проблемой, так как после окончания обработки озон превращается обратно в кислород.

6) Обработка озоном не придаёт воде никаких дополнительных посторонних веществ и химических соединений.

Недостатки метода озонирования:

1) озон не имеет пролонгированного действия, так как является нестабильным газом и быстро разлагается в обычный кислород, не накапливаясь в водной среде.

2) озонирование воды намного дороже традиционного хлорирования;

3) поверхности бассейна остаются фактором риска, так как дезинфицируется только вода, проходящая через прибор;

4) озон токсичен при вдыхании, при высоких концентрациях озона наблюдаются поражения дыхательных путей, легких и слизистой оболочки, а хроническое воздействие микро-концентраций озона на организм человека достаточно не изучено; Кроме того чистый озон взрывоопасен. По этим причинам, работа с озоном требует тщательного контроля техники безопасности.

В общественных бассейнах генератор озона допустимо использовать только в комплексе с хлорной станцией. Обработка воды методом озонирования совместно с методом хлорирования – отличный вариант для больших бассейнов. Благодаря обработке озоном, вода в бассейне будет прозрачной, чистой и эффективно обеззараженной. Останется только поддерживать небольшую концентрацию хлора для предотвращения проникновения в бассейн и роста патогенных микроорганизмов. При этом образование хлораминов будет сведено к минимуму, а, следовательно, меньше запах хлорки и раздражение кожи и глаз.

Подведем итог. Для дезинфекции воды в общественных плавательных бассейнах используется метод хлорирования в чистом виде или в комбинации с другими методами дезинфекции. При выборе бассейна для занятий плаванием следует предпочесть тот, где для дезинфекции воды используется комбинация методов обеззараживания, что снижает количество применяемой хлорки, а, следовательно, уменьшает опасность раздражения кожи, слизистых оболочек и глаз. Чтобы обеспечить качественную химическую очистку воды нужно обеспечить бесперебойную перекачку

всего объема воды. Ответственность за эту операцию возлагается на фильтрационную установку. Описание работы фильтрационной установки приведено ниже.

1.5 Механическая очистка воды

Вода в бассейне должна не только тщательно фильтроваться, но и не менее тщательно перемешиваться. При неправильном распределении могут образовываться мертвые зоны, в которых процесс растворения реагентов осуществляется недостаточно и накапливаются загрязнения. Чтобы этого не происходило, вода постоянно «прокачивается» через гидравлическую систему, включающую скиммеры, донные сливы, возвратные форсунки, накопительную емкость и т. д. Конечный результат зависит от слаженной работы всех элементов, но ключевая роль принадлежит насосу — сердцу системы.

По способу забора воды, а вернее сказать, по схеме циркуляции бассейны бывают двух типов: скиммерные и переливные.

Скиммер — это специальное устройство, через которое из бассейна удаляется самый загрязненный верхний слой воды. Представляет собой полый пластиковый или металлический (из нержавеющей стали) бак, в нижней части которого через резьбовое соединение подключается труба магистрали водозабора. На боковой поверхности имеется прямоугольное приемное окно с плавающей заслонкой. Через это отверстие вода втягивается в скиммер и направляется для дальнейшей фильтрации и нагрева.

Плавающая заслонка, колеблясь, разрушает поверхностное натяжение воды и таким образом собирает с поверхности загрязнения. Кроме того, она предотвращает обратный выброс грязи при остановке насоса. Каждый скиммер снабжается также фильтром грубой очистки, а проще говоря, ситом для задержания крупного мусора — фантиков, жвачки и пр.

Обычно скиммеры встраиваются в стенки железобетонной чаши (для этого требуются закладные элементы). Но бывают и навесные. Они просто

крепятся на борт бассейна и используются в небольших сборных резервуарах, когда нет возможности установить встраиваемый вариант. Такие устройства снабжены возвратной трубой фильтровальной установки, то есть вода уходит из чаши через скиммер и через него же возвращается обратно.

Количество скиммеров в бассейне зависит от его площади-одна установка обслуживает не больше 25 $м^2$. Кроме того, необходимо принимать во внимание форму чаши, глубину и производительность фильтровальной установки. При приобретении этих устройств нужно учитывать, что одни модели предназначены для установки в бассейны, отделанные плиткой , другие же ориентированы исключительно на сборные. Впрочем есть и универсальные конструкции.

Помимо скиммеров существуют еще донные сливы (трапы), расположенные, как правило, в самых глубоких местах. Служат они главным образом для опорожнения чаши.

Для возврата же воды в общем случае предназначены форсунки, которые так и называются — возвратными. Или трисками. Их количество и размещение зависят как от параметров формы и размеров бассейна, так и от числа скиммеров. Устанавливаются они на глубине примерно 40 см от поверхности.

Скиммерная схема используется во многих частных бассейнах, особенно если его размеры невелики. Но если расстояние между стенками превышает 8 м или форма сложная, то форсунки просто не «дотягиваются» до середины водоема, и эффективного перемешивания воды не происходит. Тогда применяют другую схему — с переливным желобом. Во всяком случае, для закрытых бассейнов — открытые в наших широтах делать переливными не слишком хорошо, поскольку возникают трудности при консервации на зиму.

Вода в бассейнах с переливным желобом заполняет чашу полностью, по самые края. Через них она выплескивается в проходящий, как правило, по

периметру чаши желоб. А оттуда (через отводы) — в переливной бак. Последний служит для подпитки свежей водой и защиты насоса от сухого хода. Возвратные форсунки располагаются (опять же, как правило) на дне. Таким образом, отфильтрованная и подогретая жидкость распространяется по всему объему чаши достаточно равномерно.

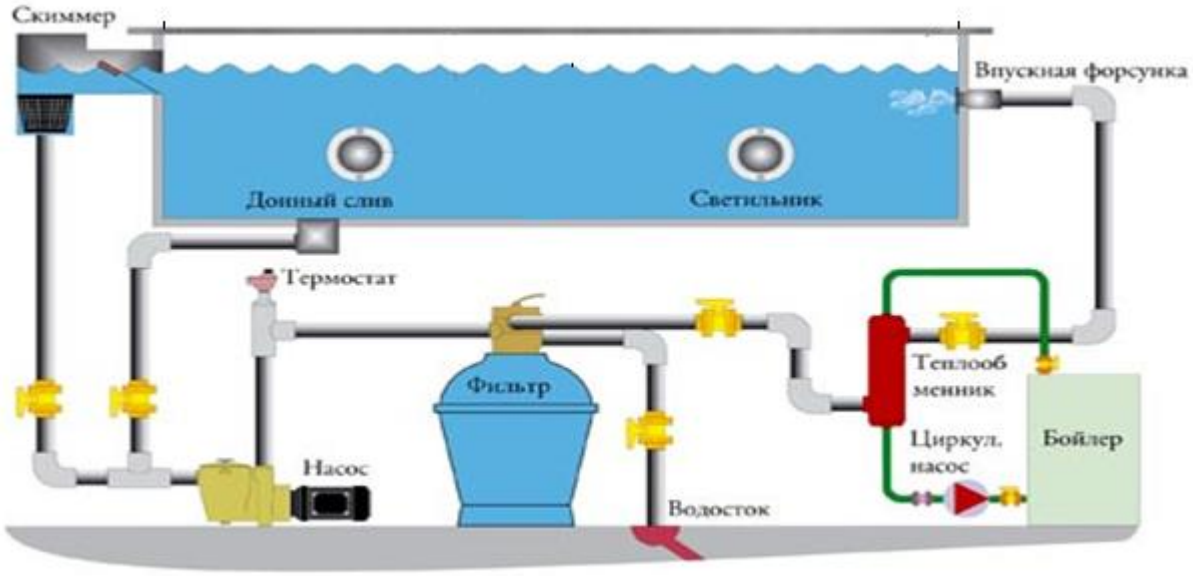

Рисунок 1. Схема фильтрации бассейна.

Сердце бассейна — это насос фильтровальной установки. Именно он обеспечивает циркуляцию воды, забирая через скиммер грязную и, пропустив через фильтр, возвращая обратно уже чистую. Чаще всего насос изначально входит в состав фильтровальной установки и даже крепится на ее платформе. Связано это с тем, что параметры этих устройств тесно связаны. Если, например, производительность насоса будет больше аналогичного показателя фильтра, вода станет проходить через песок слишком быстро, и качество очистки снизится. Более того, это может повредить и сам фильтр.

Если бассейн эксплуатируется интенсивно, бывает нелишним иметь резервный насос на случай поломки основного. В общественных же водоемах наличие «дублера» является обязательным условием, необходимым для бесперебойного функционирования. Чтобы резервный насос не создавал повышенного гидравлического сопротивления, он устанавливается не в одну линию с основным, а параллельно. Это способ более затратный и, как

правило, требует определенных подготовительных работ при проектировании и строительстве бассейна. Однако в случае выхода из строя основного насоса подключение резервного выполняется наиболее простым способом.

Фильтр-устройство, которое служит для очистки воды от грязи, пыли, песка. Фильтр должен работать все время, вне зависимости, пользуетесь ли вы бассейном или нет. Разница лишь в том, что бассейн, которым интенсивно пользуются, надо промывать фильтровальную систему чаще.

Нагреватель служит для нагрева воды до требуемой температуры и поддержания ее в определенном диапазоне.

Устройства химической очистки, служат для обеззараживания воды. Уничтожения биологически активных загрязнителей и продуктов жизнедеятельности (микроорганизмы, водоросли, бактерии, вирусы, потожировые выделения).

Теперь о том, что же собой представляют сами насосы. Это обычные самовсасывающие центробежные агрегаты. Самовсасывание нужно для того, чтобы можно было устанавливать их выше уровня воды (до 3 метров) без обратного клапана. В противном случае последний должен быть установлен на всасывающем трубопроводе и, более того, залит при первом пуске. Это неудобно хотя бы из-за более высокой подверженности засорам. Впрочем, даже самовсасывающие модели лучше располагать ниже уровня воды. Иначе насос будет работать с перегрузкой и прослужит не так долго, как мог бы. Вот почему фильтровальную установку в закрытых бассейнах чаще всего размещают в подвале.

В бассейне, расположенном на свежем воздухе, это сделать труднее. Поэтому в последнее время появились специальные контейнеры для оборудования. Они представляют собой емкости из твердого термопластика, снабженные крышкой. Внутри устанавливается необходимая для нормального функционирования бассейна техника: система дезинфекции, трансформаторы, блоки управления и насос для гидромассажа. Выпускаются

такие контейнеры для фильтровальных установок разной производительности.

Самое главное преимущество — возможность скрытого размещения в непосредственной близости к бассейну. Таким образом, решаются сразу две задачи — оборудование не занимает места и располагается ниже уровня воды. «Погружные» контейнеры имеют плоскую, обычно зеленую крышку, которая сливается с газоном. Есть и «полупогружное» исполнение, когда крышка выступает над уровнем земли. Не так эстетично, но зато легче обслуживать.

Но вернемся к насосам фильтровальных установок. Среди всех остальных они выделяются наличием префильтра (фильтра предварительной очистки), предназначенного для улавливания крупного мусора — детских игрушек, пластиковых бутылок и прочего. Иначе можно повредить рабочее колесо.

Другое отличие — в используемых материалах. Казалось бы, вода в бассейне такая же, как в колодце или скважине, но нет. Она содержит необходимые для дезинфекции хлорные соединения. Обычный стальной насос в данных условиях довольно быстро корродирует. По этой причине и корпус, и рабочее колесо изготавливают либо из высокопрочного пластика, либо из бронзы. А в бассейнах с морской водой (редкость, но тем не менее) — только из бронзы, поскольку пластик накапливает отложения солей.

Насосы небольшой мощности обычно рассчитаны на переменный ток в 220 В, агрегаты помощнее — на 380 В. По требованиям техники безопасности подключение в любом случае должно производиться через УЗО (устройство защитного отключения). А вообще в зависимости от сложности оборудования и потребляемой им мощности предусматриваются специальные системы защиты.

2. ВЫБОР ПРИНЦИПОВ УПРАВЛЕНИЯ И СИЛОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1 Расчет объема бассейна и требуемой производительности насоса

В данном разделе будут произведены основные расчеты параметров компонентов технологического процесса для конкретного бассейна с определенными габаритами.

Параметры бассейна:

A=30м

B=7м

C=2м

Рассчитываем объем бассейна:

$$V = A \cdot B \cdot C = 30 \cdot 7 \cdot 2 = 420 м^3$$

В бассейнах с рециркулируемым режимом вся вода, находящаяся в бассейне, должна пройти через фильтры 3 раза в сутки. Исходя из этого условия, рассчитывают производительность фильтровальной установки и подбирают насос: объем бассейна умножается на кратность водообмена и полученное произведение делится на число часов работы фильтровальной установки в течение суток.

Рассчитываем производительность фильтрационной установки:

$$Q = \frac{V \cdot n}{t} = \frac{420 \cdot 3}{12} = 105 м^3 / ч$$

Где: Q-производительность фильтрационной установки, $м^3$/ч;

n-кратность водообмена;

t-число часов работы фильтрационной установки, ч;

Исходя из данного расчета мы должны выбрать насос с производительностью не меньше 105$м^3$/ч.

Далее рассчитаем требуемую минимальную мощность двигателя:

$$P_{расч} = K_з \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot 3600 \cdot \eta} = 1.2 \cdot \frac{1010 \cdot 9.8 \cdot 105 \cdot 10}{1000 \cdot 3600 \cdot 0.75} \approx 4.62 кВт$$

Q- подача насоса , $м^3/ч$;H- напор насоса, м η - КПД насоса; 1000 – 1020- плотность жидкости в расчетах выбираем в зависимости от физико-химических свойств вод; Кз=1.2 .

2.2 Выбор насосного агрегата.

Исходя из этих условий и вышеперечисленного расчёта, выбираем насос IML Atlas AT 0750.

Рисунок 2. Внешнй вид насоса IML Atlas AT 0750

Насос IML Atlas AT 07050 предназначен для перекачивания воды в системах водоподготовки плавательных бассейнов и может выполнять функции:

-циркуляции насоса фильтровальной установки в контуре системы водообмена бассейна;

- циркуляционного насоса в контуре систем аттракционов (водопад, гидромассаж, искусственное течение) бассейна;

Область применения плавательные бассейны.

Технические характеристики насоса:

Основные технические характеристики насоса приведены в таблице 1.

Таблица 1 Основные технические характеристики насоса.

Наименование параметра	**Ед. изм.**	**Значение параметра**
Напряжение	В	~380
Допустимые отклонения напряжения питания от номинального значения	%	±4%
Потребляемая мощность	кВт	5,5
Класс изоляции	-	Класс I F
Масса	кг	57
Температура окружающего воздуха	ºС	от +10 до +35
Влажность окружающего воздуха, не более	%	60
Температура воды, не более	ºС	45
Производительность	$м^3$/ч	118
Класс защиты IP	-	55
Соединение	мм	110
Синхронная скорость вращения	об/мин	3000

Напорная характеристика для насоса IML Atlas AT 0750 приведена на рисунке 3. На данной характеристике представлена зависимость напора насосного агрегата от его производительности. С увеличением

производительности происходит практически линейной уменьшение напора перекачиваемой жидкости.

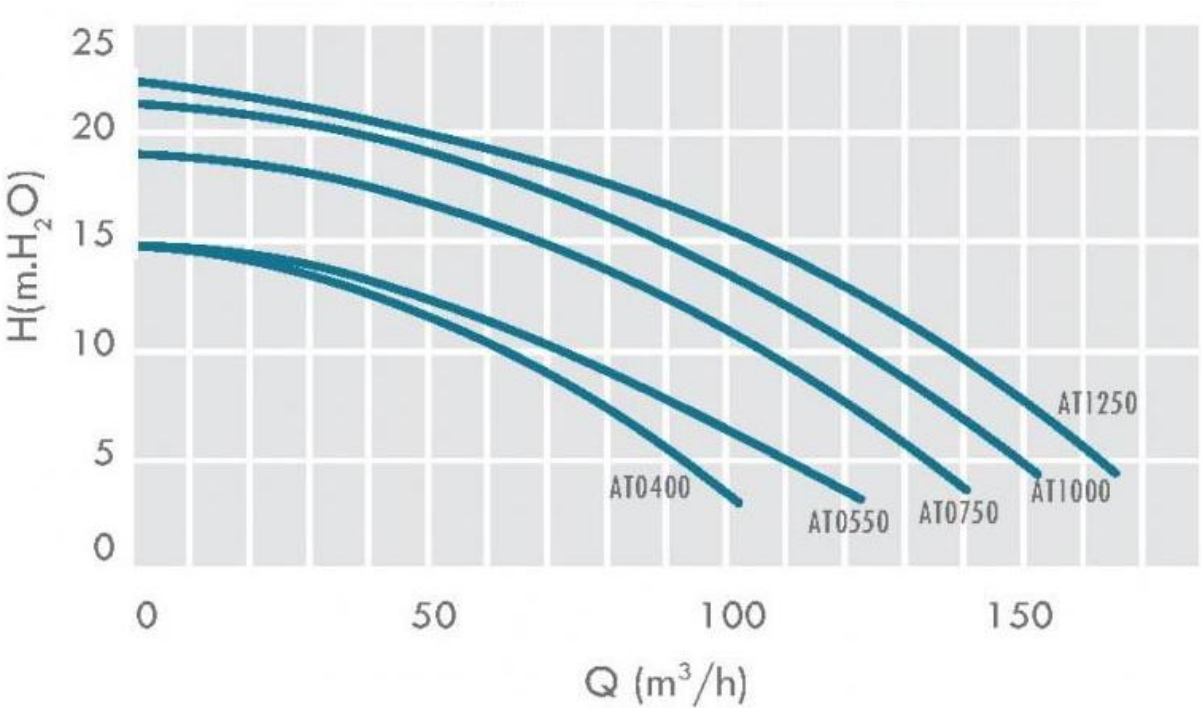

Рисунок 3. Напорная характеристика насоса IML Atlas AT 0750 .

2. 3 Проверка двигателя

Так как модель насосного агрегата IML Atlas AT 0750 включает в себя асинхронный двигатель мощностью 5.5 кВт и синхронной скоростью n=3000 об/мин то потребность в выборе двигателя отсутствует. Однако для разработки системы управления нам необходимо знать параметры двигателя. Исходя из этого осуществим проверку существующего двигателя и определим параметры схемы замещения. Паспортные данные двигателя приведены в таблице 2

Таблица 2. Паспортные данные двигателя

Мощность, кВт	5.5
Синхронная частота вращения, об/мин	3000
Номинальная частота вращения, об/мин	2895

КПД при нагрузке 100% , о.е.	0,87
КПД при нагрузке 75% , о.е.	0,875
cosφ при нагрузке 100% , о.е.	0,89
cosφ при нагрузке 75% , о.е.	0,88
Ток номинальный Iн, А	10,8
Кратность пускового тока $\frac{I\text{пуск}}{I\text{н}}$	6,5
Кратность пускового момента $\frac{\text{Мпуск}}{\text{Мн}}$	2,4
Кратность максимального момента $\frac{\text{М}max}{\text{Мн}}$	3
Момент инерции J , кг·м2	0,0145

2.3.1 Расчет параметров схемы замещения.

Рассчитаем параметры схемы замещения по каталожным данным электродвигателя. Воспользуемся Т-образной схемой замещения.

Параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя:

Номинальное фазное напряжение: $U_{1\text{Н}} = 220$ В

Номинальное напряжение сети: $U_{\text{ФН}} = 380$ В

Коэффициент загрузки двигателя: $p_{\text{Ж}} = 0,75$ о.е.

Число пар полюсов: $p = 1$

Математическая модель асинхронного двигателя может быть представлена различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для расчетов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является Т-образная схема замещения:

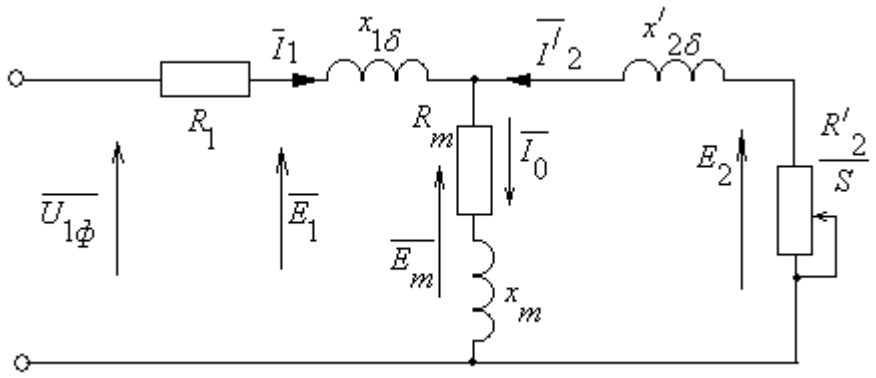

Рисунок. 4. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя,

где $U_{1ф}$ – фазное напряжение подводимое к обмотке статора двигателя;

I_1 – ток обмотки статора;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

$X_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

$I_2^{/}$ – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора;

$R_2^{/}$ – приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;

$X'_{2\sigma}$ – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;

I_0 – ток холостого хода (намагничивания);

X_m - индуктивное сопротивление контура намагничивания.

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие данной схеме:

$$\bar{E}_m + j \cdot X'_2 \cdot \bar{I}'_2 + R'_2 \cdot \bar{I}'_2 / s = 0$$

$$\bar{U}_{1\Phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}'_2 - \bar{I}_0 = 0$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений изображена на рисунке.5.

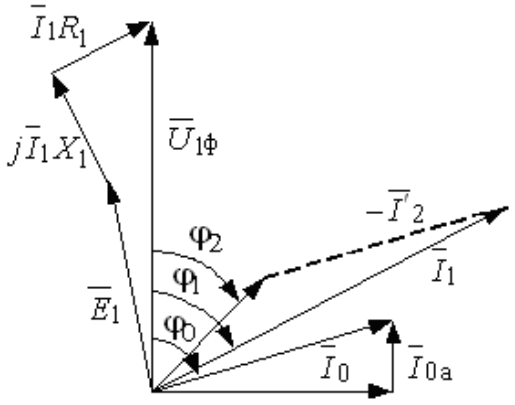

Рисунок 5. Векторная диаграмма асинхронной машины

Найдем синхронную частоту вращения и номинальное скольжение:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3{,}14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с};$$
$$s_{\text{Н}} = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{3000 - 2895}{3000} = 0{,}035 \text{ о.е.}$$

Ток холостого хода асинхронного двигателя определяется по формуле:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 \cdot (p_Ж \cdot I_{1H} \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p_Ж \cdot s_H})^2}{1 - (p_Ж \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p_Ж \cdot s_H})^2}} \text{ А},$$

где I_{11} - ток статора двигателя при частичной загрузке:

$$I_{11} = \frac{p_{\text{Ж}} \cdot P_{\text{Н}}}{3 \cdot U_{1\text{Н}} \cdot \cos\varphi_{\text{РЖ}} \cdot \eta_{\text{НРЖ}}} = \frac{0{,}75 \cdot 5500}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}88 \cdot 0{,}875} = 8{,}48 \text{ А};$$

где $\eta_{\text{НРЖ}} = \eta_{\text{Н}} = 0{,}875$ о.е. – КПД при частичной загрузке;

$\cos\varphi_{РЖ}$ - коэффициент мощности при частичной загрузке:

$$\cos\varphi_{\text{РЖ}} = \cos\varphi \cdot \left(\frac{\cos\varphi_{0{,}75}}{\cos\varphi} \right) = 0{,}89 \cdot 0{,}97 = 0{,}88 \text{ о.е.};$$

где $\cos\varphi_{0.75}/\cos\varphi_{н}$= 0,97 – относительный коэффициент мощности при частичной загрузке (из графика на рисисунке 6):

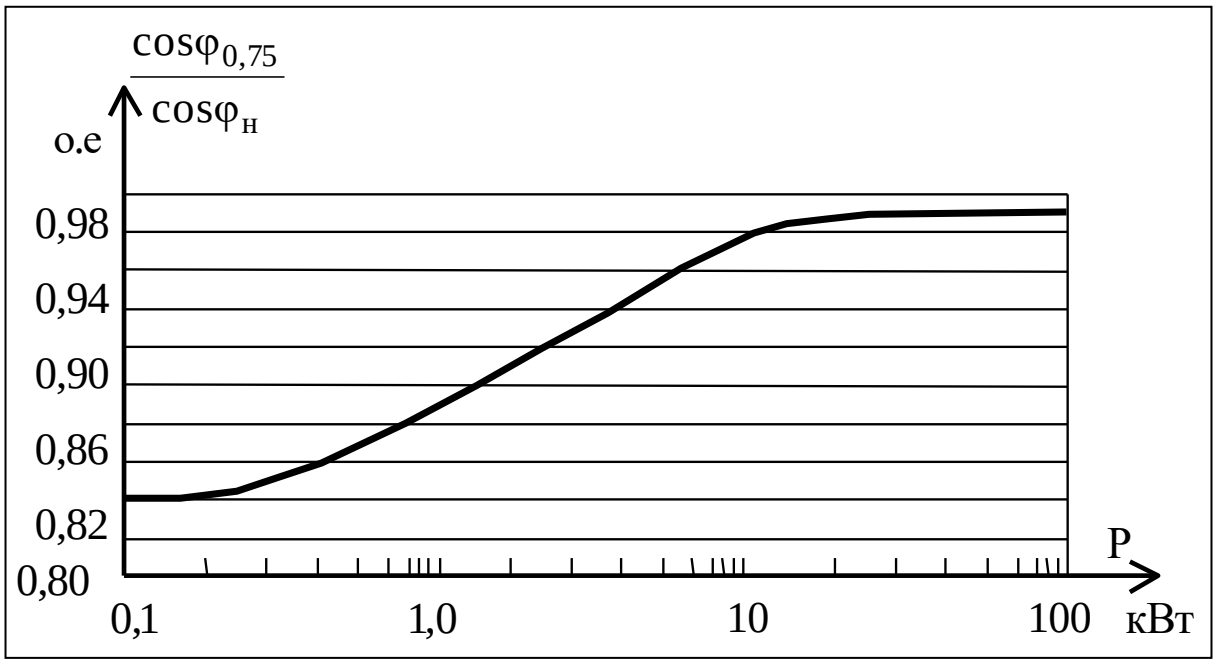

Рисунок 6. Зависимость $\cos\phi_{0,75}/\cos\phi_{н}$ от мощности асинхронного двигателя

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_{1Н} = \frac{P_{Н}}{3 \cdot U_{1Н} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_{Н}} = \frac{5500}{3 \cdot 220 \cdot 0,89 \cdot 0,87} = 10,76\text{A};$$

В итоге, ток холостого хода двигателя равен:

$$I_0 = \sqrt{\frac{8,48^2 \cdot (0,75 \cdot 10,76 \cdot \frac{1-0,035}{1-0,75 \cdot 0,035})^2}{1-(0,75 \cdot \frac{1-0,035}{1-0,75 \cdot 0,035})^2}} = 4,22\text{ A}.$$

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. В первом приближении принимаем $\beta = 1$:

$$s_{\text{К}} = s_{\text{Н}} \cdot \frac{k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 - \left[1 - 2 \cdot s_{\text{Н}} \cdot \beta \cdot \left(k_{max} - 1\right)\right]}}{1 - 2 \cdot s_{\text{Н}} \cdot \beta \cdot \left(k_{max} - 1\right)};$$

$$s_{\text{К}} = 0,035 \cdot \frac{3 + \sqrt{3^2 - \left[1 - 2 \cdot 0,035 \cdot 1 \cdot \left(3 - 1\right)\right]}}{1 - 2 \cdot 0,035 \cdot 1 \cdot \left(3 - 1\right)} = 0,238 \text{ о.е.}$$

Найдем значения коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\text{Н}}} = \frac{4,22}{2 \cdot 6,5 \cdot 10,76} = 1,03;$$

$$A_1 = m \cdot U_{1\text{Н}}^2 \cdot \frac{1 - s_{\text{Н}}}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_{\text{Н}}} = 3 \cdot 220^2 \frac{1 - 0,035}{2 \cdot 1,03 \cdot 3 \cdot 5500} = 4,122.$$

Теперь можно определить активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2^{'} = \frac{A_1}{(\beta + \frac{1}{s_{\text{К}}}) \cdot C_1} = \frac{4,12}{(1 + \frac{1}{0,238}) \cdot 4,12} = 0,77 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2^{'} \cdot \beta = 1,03 \cdot 0,77 \cdot 1 = 0,79 \text{ Ом.}$$

Определим параметр γ, который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_{\text{КН}}$:

$$\gamma = \sqrt{(\frac{1}{s_K^2}) - \beta^2} = \sqrt{(\frac{1}{0,238^2}) - 1} = 4.077.$$

Найдем значение индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$X_{\text{КН}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2^{'} = 4.07 \cdot 1,03 \cdot 0,77 = 3,233 \text{ } Ом.$$

Найдем индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$x'_{2\text{Н}} = 0,58 \cdot \frac{X_{\text{КН}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{3,233}{1,03} = 1.82 \text{ Ом.}$$

Найдем индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$x_{1H} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 3,233 = 1,358 \text{ Ом.}$$

По найденным значениям C_1, R'_2 и $X_{\text{КН}}$ определим критическое скольжение:

$$s_{\text{К1}} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{КН}}^2}} = \frac{1,03 \cdot 0,77}{\sqrt{0,79^2 + 3,23^2}} = 0,238 \text{ о.е.}$$

Рассчитанные значения $s_{\text{К1}} = s_{\text{К}} = 0,16$ равны.

Для того чтобы найти ЭДС ветви намагничивания E_1 найдем $\sin\varphi$:

$$\varphi = \arccos(\cos\varphi) = \arccos(0,89) = 0,473;$$
$$\sin\varphi = 0,456.$$

Найдем ЭДС ветви намагничивания E_1, наведенную потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin\varphi - x_{1H} \cdot I_{1H})};$$

$$E_1 = \sqrt{(220 \cdot 0,89 - 0,79 \cdot 10,76)^2 + (220 \cdot 0,456 - 1,358 \cdot 10,76)^2} = 205,944 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$x_{\mu\text{Н}} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{205,94}{4,22} = 48,77 \text{ Ом.}$$

Индуктивность рассеяния статорной обмотки:

$$L_{\sigma 1} = \frac{X_{1\text{Н}}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{1,358}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0043 \text{ Гн.}$$

Индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенная к статорной:

$$L'_{\sigma 2} = \frac{X'_{2\text{Н}}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{1,82}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00579 \text{ Гн.}$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu\text{Н}}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{48,77}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,15 \text{ Гн.} 2.3.24$$

Полная индуктивность цепи статора:

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{\mu} = 0,0043 + 0,15 = 0,1543 \text{ Гн.}$$

Полная индуктивность цепи ротора:

$$L'_2 = L'_{\sigma 2} + L_{\mu} = 0,00579 + 0,15 = 0,1559 \text{ Гн.}$$

Рассчитаем коэффициенты структурной схемы:

$$K_r = \frac{L_{\mu}}{L'_2} = \frac{0,15}{0,1559} = 0,962;$$

$$L_{\text{Э}} = L_1 - \frac{L_{\mu}^2}{L'_2} = 0,1543 - \frac{0,15^2}{0,1559} = 0,0099 \text{ Гн;}$$

$$R_{\text{Э}} = R_1 + R'_2 \cdot K_r^2 = 0,79 + 0,77 \cdot 0,962^2 = 1,5 \text{ Ом;}$$

$$A_r = \frac{R'_2}{L'_2} = \frac{0,77}{0,1559} = 4,49.$$

Таблица 3.Параметры схемы замещения электродвигателя

R_1, Ом	$X_{1\text{Н}}$, Ом	$L_{1\sigma}$, мГн	X_{μ}, Ом	L_{μ}, Гн	R'_2, Ом	$X'_{2\text{Н}}$, Ом	$L'_{2\sigma}$, мГн	$X_{КН}$, Ом
0.79	1.358	4.3	48.77	0.15	0.77	1.82	5.79	3.233

2.3.2 Расчет и посторенние электромеханической характеристики электродвигателя.

Найдем синхронную угловую скорость:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{1} = 314 \ \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Рассчитаем и построим естественную электромеханическую характеристику:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0{}^2 + I'_2(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin \phi_2}$$, где

$$\sin\phi_2 = \frac{x_{КН}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}})^2 + x_{КН}^2}}$$

$I'_2(\omega)$ - значение приведенного тока ротора от скольжения;

$$I'_2 = \frac{U_{1н}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}})^2 + (x_{1н} + x'_{2н})}}$$

По вышеприведенным формулам рассчитывается естественная электромеханическая характеристика, приведенная на рисунке 7:

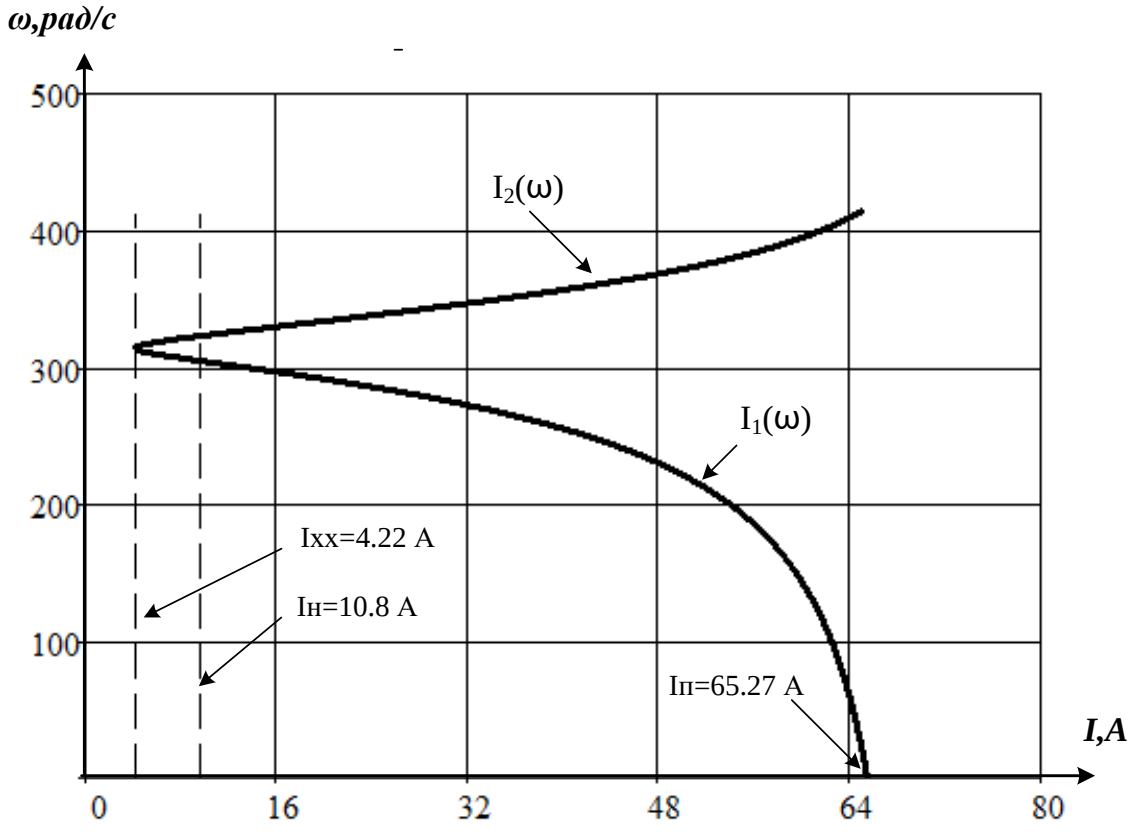

Рисунок 7. Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя.

2.3.3 Расчет и построение механической характеристики электродвигателя.

Рассчитаем и построим естественную механическую характеристику по следующей формуле:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U^2_{1н} \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \cdot [(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}})^2 + x^2_{кн}]}$$

Рассчитаем контрольные точки механической характеристики по паспортным данным:

Номинальная скорость:

$$\omega_н = \omega_0 \cdot (1 - S_н) = 314 \cdot (1 - 0{,}035) = 303.14 \text{ рад/с};$$

Момент номинальный:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{5500}{303.14} = 18.14 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

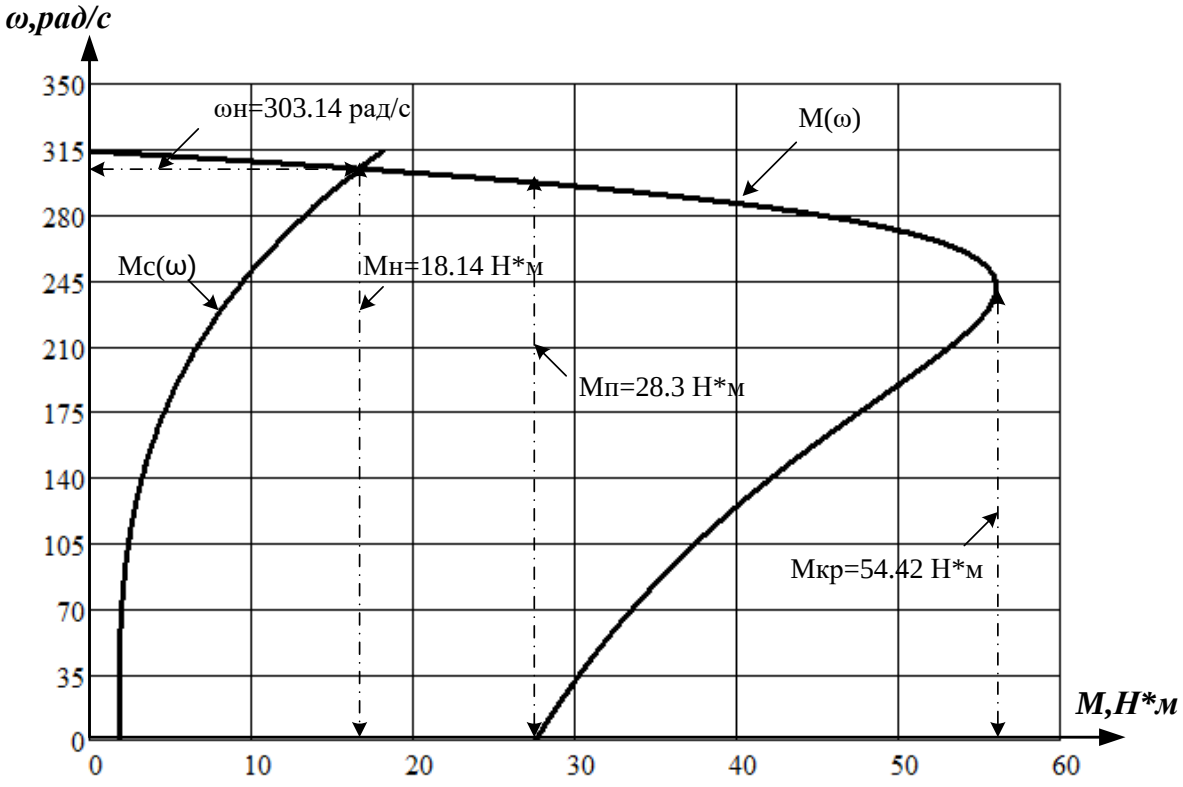

Рисунок 8. Естественная механическая характеристика

асинхронного двигателя.

2. 4 Выбор преобразователя частоты.

С точки зрения энергетики основным параметром электропривода является его мощность. Поэтому при выборе преобразователя частоты в первую очередь необходимо определить требования к его нагрузочной способности. Вторым немаловажным параметром преобразователя являются требования к напряжению питающей сети. Как правило, преобразователи питаются от трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В, разброс +10% / -15%, что вполне соответствует требованиям российских стандартов к качеству электроснабжения.

В настоящее время существует большое количество различных преобразователей частоты. Ведущие позиции среди них занимают преобразователи таких фирм, как “ВЕСПЕР”, ” Siemens”, “ABB”, “Danfoss ”, “Omron”, “Mitsubishi”, “Schneider Electric”, “Delta Electronics”.

Выбираем ПЧ при условии:

$$I_{\text{Н ПЧ}} \geq 1,2 I_{\text{Н ДВ}}$$

Выбираем преобразователь частоты фирмы «Веспер» марки E2-8300-007H

Рисунок 9. Внешний вид преобразователя частоты E2-8300-007H

Новая модель ВЕСПЕР серии E2-8300 со встроенным промышленным PLC контроллером и существенно расширенными функциональными возможностями по отношению к EI-8001. Рекомендуется для управления приводами с постоянной, быстроменяющейся, а также вентиляторной нагрузкой: подъемно-транспортное оборудование, транспортеры, конвейеры, экструдеры, куттера, упаковочные и дозирующие машины, сушильные агрегаты, сепараторы, мельницы, дробилки, вентиляторы, насосы, компрессоры и т.д. Частотный преобразователь ВЕСПЕР E2-8300 - имеет самую низкую цену в классе общепромышленных частотников.

Таблица 4. Параметры преобразователя частоты E2-8300-007H

Выходные параметры преобразователя	
Выходной ток	13 А
Выходное напряжение	3-фазное ~380...460В
Частота выхода	1...650 Гц
Входные параметры	

преобразователя	
Входное напряжение	3-фазное ~380...460В
Допустимое отклонение напряжения	-15 ~ +10%
Допустимое отклонение частоты	±5%
Конструктив	
Габариты (ШхВхГ)	186x260x195 мм
Вес	6.5 кг

В ходе раздела выбор силовых компонентов, был произведен расчет габаритов бассейна. Для данного бассейна была рассчитана нагрузка на насосный агрегат, который будет эксплуатироваться. По данной нагрузке был произведен конкретный выбор насосного агрегата IML Atlas AT 0750. После чего были определены параметры схемы замещения для асинхронного двигателя, построены его естественные электромеханическая и механическая характеристики. Далее был произведен выбор преобразователя частоты. В следующем разделе будет произведено моделирование асинхронного двигателя, на базе которого в последующем будет разработана система управления для данного бассейна.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.

3.1 Модель АД в неподвижной системе координат

Для данной магистерской диссертации будет смоделирована модель асинхронного двигателя(АД) в неподвижной системе координат на основании которой будет разработана система управления. Для построения имитационной модели необходимо принять определенный уровень идеализации свойств АД и ПЧ. В теории электропривода переменного тока общепринятыми допущениями принято считать следующее:

1) Не учитывать потери в стали.
2) Рассматриваем трехфазный симметричный режим работы.
3) Насыщение магнитной цепи АД не учитывается.
4) Принимаем напряжение на выходе ПЧ строго синусоидальной формы.
5) Пренебрегаем влиянием силового канала между АД и ПЧ.

Если взять за основу классическую «Т-образную схему замещения АД, можно рассмотреть процессы, описывающие модель АД, используя систему следующих векторный дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \dfrac{d\Psi_s}{dt} \\ U_r = R_r I_r + \dfrac{d\Psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \Psi_r \\ \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \\ M = \dfrac{3}{2} z_p (\Psi_s \times I_s) \\ \dfrac{d\omega_r}{dt} = \dfrac{1}{J}(M - M_c) \end{cases}$$

Здесь $U_s, U_r, I_s, I_r, \Psi_s, \Psi_r$ - двухэлементные векторы напряжений, токов и потокосцепления, представленные в ортогональной (двухфазной) системе координат в виде составляющих по координатным осям. Механические параметры системы представлены следующими переменными:

J - момент инерции, ω_r -частота вращения ротора, z_p -число пар полюсов АД, M и M_c электромагнитный момент и момент нагрузки. Вспомогательная матричная константа j служит для «переворота» компонентов векторных переменных и позволяет упростить форму записи системы уравнений.

Выражаясь языком математических формул можно утверждать следующее:

$$U_s = \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix}, U_r = \begin{bmatrix} u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix}, I_s = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}, I_r = \begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}$$

$$\Psi_s = \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \end{bmatrix}, \Psi_r = \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix}, j = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Таким образом индексы «α и β» будут соответствовать компонентам вектора в неподвижной системе координат. Как будет показано дальше, компонентам вектора во вращающейся системе координат соответствуют индексы «x» и «y».

Несмотря на использование эквивалентной двухфазной модели, не будем забывать о том, что в реальной жизни стандартный АД, как правило имеет 3 фазы. Для перехода между составляющим вектора в двухфазных координатах и трехфазной координатной системы используются формулы преобразования Кларка. На примере преобразования вектора тока статора I_s, рассмотрим связь между составляющими в двухфазных координатах и трехфазной системой. Рисунок 10 поясняет данное преобразование графически. Для остальных переменных преобразования полагаем идентичными.

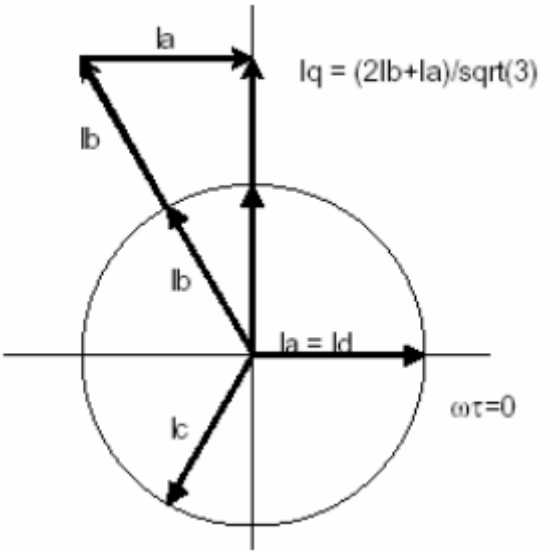

Рисунок 10. Преобразование Кларка (из трехфазной системы координат в двухфазную).

$$i_{sa} = i_{s\alpha},\ i_{s\beta} = \frac{(2i_{sb} + i_{sa})}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

где $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ - составляющие вектора тока статора I_s представленные в двухфазной неподвижной системе координат;

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} - фазные токи статора АД представленные в симметричной трехфазной системе.

Формула для обратного преобразования образуется из (3) после выполнения соответствующих преобразований.

Система уравнений (1) обладает избыточным числом неизвестных и для уменьшения их числа выполним подстановку. Зададимся целью исключить из системы уравнений переменные Ψ_s и I_r, оставив Ψ_r и I_s. Для этого из третьего и четвертого уравнений системы (1) выразим I_r:

$$I_r = \frac{\Psi_s - L_s I_s}{L_m}, \qquad I_r = \frac{\Psi_s - L_m I_s}{L_r}$$

Приравнивая обе части, получаем выражение:

$\Psi_s - L_s I_s = \frac{L_m}{L_r}(\Psi_r - L_m I_s)$, из которого теперь выделяем Ψ_s,

$$\Psi_s = \frac{L_m}{L_r}\Psi_r + (L_s - \frac{L_m^{\,2}}{L_r})I_s$$

В первое уравнение системы (1) подставляем выражение для Ψ_s, (5):

$$U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} = R_s I_s + \frac{L_m d\Psi_r}{L_r dt} + (L_s - \frac{L_m^{\,2}}{L_r})\frac{dI_s}{dt}$$

Во второе уравнение системы (1) подставляем I_r,(4) (правое):

$$\begin{aligned} U_r &= R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \Psi_r = \\ &= R_r(\frac{\Psi_r - L_m I_s}{L_r}) + \frac{d\Psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \Psi_r = \\ &= \frac{d\Psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \Psi_r + R_r \frac{\Psi_r}{L_r} - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s = \\ &= \frac{d\Psi_s}{dt} - (j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r})\Psi_r - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s. \end{aligned}$$

Из (7) получаем выражение для $\frac{d\Psi_r}{dt}$ и подставляем в (6):

$$\begin{aligned} U_s &= R_s I_s + \frac{L_m}{L_r}\frac{d\Psi_r}{dt} + (L_s - \frac{L_m^{\,2}}{L_r})\cdot\frac{dI_s}{dt} = \\ &= R_s I_s + \frac{L_m}{L_r}U_r + \frac{L_m}{L_r}(j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r})\Psi_r + R_r(\frac{L_m}{L_r})^2 \cdot I_s + (L_s - \frac{L_m^{\,2}}{L_r})\cdot\frac{dI_s}{dt} \end{aligned}$$

Окончательно приводим (8) к следующему виду:

$$U_s - \frac{L_m}{L_r}U_r = (R_s + R_r(\frac{L_m}{L_r})^2)I_s + \frac{L_m}{L_r}(j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r})\Psi_r + (L_s - \frac{L_m^{\,2}}{L_r})\cdot\frac{dI_s}{dt}$$

Теперь комбинируем вместе (9) и (7), после чего получаем систему эквивалентную (1), но состоящую только из двух уравнений с двумя неизвестными Ψ_r и I_s. Кроме этого, помним о том, что для АД с короткозамкнутым ротором справедливо $U_r = 0$. Выражение для электромагнитного момента перепишем с использованием (5):

$$\begin{cases} U_s = (R_s + R_r(\frac{L_m}{L_r})^2)I_s + \frac{L_m}{L_r}(j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r})\Psi_r + (L_s - \frac{L_m^{\,2}}{L_r})\cdot\frac{dI_s}{dt} \\ 0 = \frac{d\Psi_r}{dt} - (j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r})\Psi_r - R_r\frac{L_m}{L_r}I_s \\ M = \frac{3}{2}z_p\frac{L_m}{L_r}(\Psi_r \times I_s) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_c) \end{cases}$$

Для упрощения записи системы уравнений введем дополнительные коэффициенты и перейдем к операторной форме.

$$\begin{cases} U_s = R_e I_s + K_r j\omega_r z_p \Psi_r - K_r A_r \Psi_r + L_e \cdot pI_s \\ 0 = p\Psi_r - j\omega_r z_p \Psi_r + A_r \Psi_r - R_r K_r I_s \\ M = \frac{3}{2}z_p K_r(\Psi_r \times I_s) \\ p\omega_r = \frac{1}{J}(M - M_c) \end{cases}$$

где $K_r = \frac{L_m}{L_r}, R_e = R_s + R_r \cdot K_r^{\,2}, L_e = L_s - \frac{L_m^{\,2}}{L_r}, A_r = \frac{R_r}{L_r}$

Систему (11) перепишем, выразив производные вектора тока и потокосцепления:

$$\begin{cases} pI_s = \frac{1}{L_e}(U_s - R_e I_s - K_r \omega_r z_p j\Psi_r + K_r A_r \Psi_r) \\ p\Psi_r = R_r K_r I_s - A_r \Psi_r + \omega_r z_p j\Psi_r \\ M = \frac{3}{2}z_p K_r(\Psi_r \times I_s) \\ p\omega_r = \frac{1}{J}(M - M_c) \end{cases}$$

Далее необходимо систему векторных уравнений (13) представить в скалярном виде, подставив вместо векторов Ψ_r и I_s составляющие по координатам. Векторное произведение в выражении для электромагнитного момента раскроем в соответствии с правилами векторной алгебры. С учетом (2) получаем новую систему скалярных уравнений, имеющую следующий вид:

$$\begin{cases} pI_{s\alpha} = \dfrac{1}{L_e}(u_{s\alpha} - R_e i_{s\alpha} - K_r \omega_r z_p \psi_{r\beta} + K_r A_r \psi_{r\alpha}) \\ pi_{s\beta} = \dfrac{1}{L_e}(u_{s\beta} - R_e i_{s\beta} - K_r \omega_r z_p \psi_{r\alpha} + K_r A_r \psi_{r\beta} \\ p\psi_{r\alpha} = R_r K_r i_{s\alpha} - A_r \psi_{r\alpha} - \omega_r z_p \psi_{r\beta} \\ M = \dfrac{3}{2} z_p K_r (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \\ p\omega_r = \dfrac{1}{J}(M - M_c) \end{cases}$$

Общий вид системы уравнений (14) является наиболее подходящим для моделирования динамических режимов работы АД. Выбирая способ для решения системы дифференциальных уравнений, следует отдавать предпочтение численным методом высших порядков. Задача решения системы уравнений может быть также успешно решена с использованием средств структурного моделирования (*Simulink*, *Windora*). На рисунке 11 представлена структурная схема имитационной модели АД, созданная на базе системы дифференциальных уравнений (14).

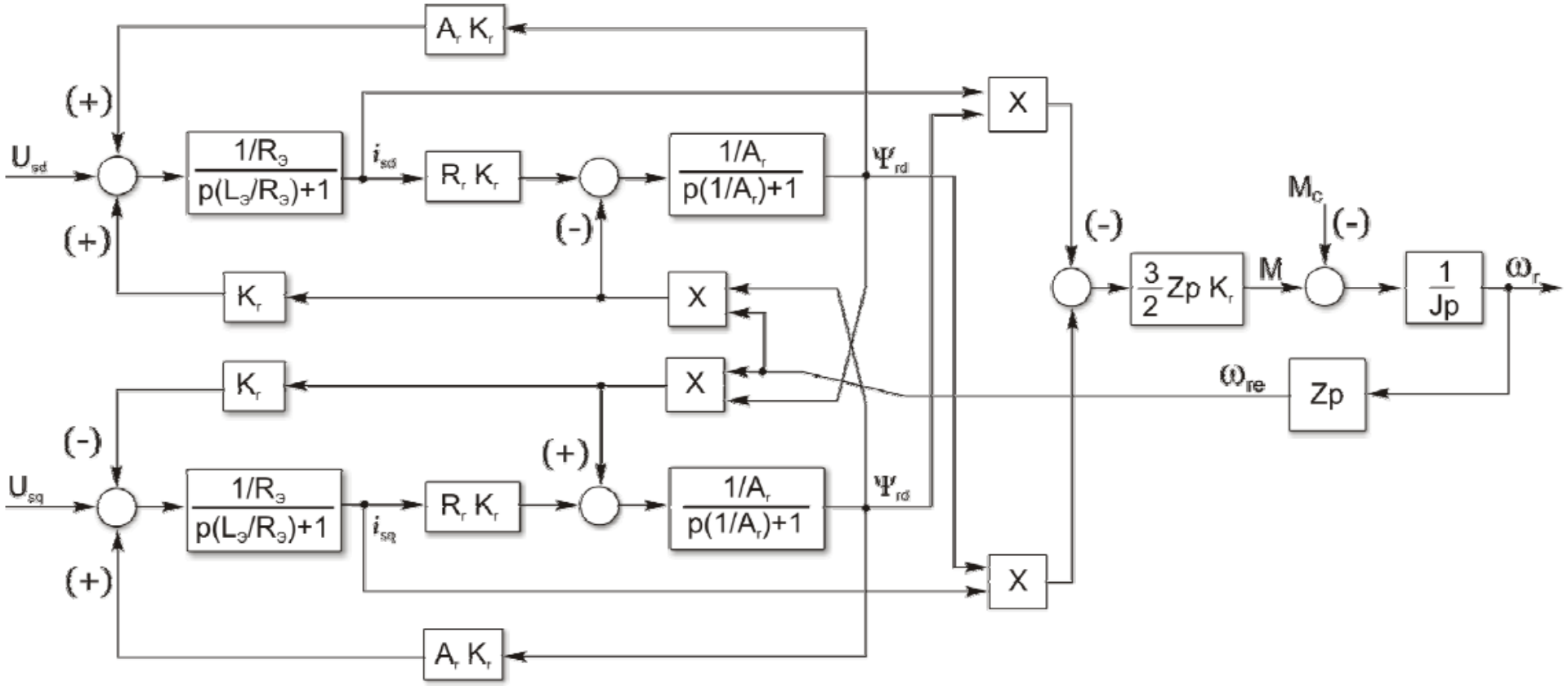

Рисунок 11. Структурная схема имитационной модели АД при использовании неподвижной системы координат.

На рисунке 13 представлена модель, собранная на основании структурной схемы АД при использовании неподвижной системы координат. Перед началом моделирования в главном окне происходит запуск программного М-файла (рисунок 3), что приводит к инициализации необходимых переменных, находящихся в *Workspace*. Далее в приложении *Simulink* загружается файл со структурной схемой имитационной модели (рисунок 12) и запускается расчет переходного процесса.

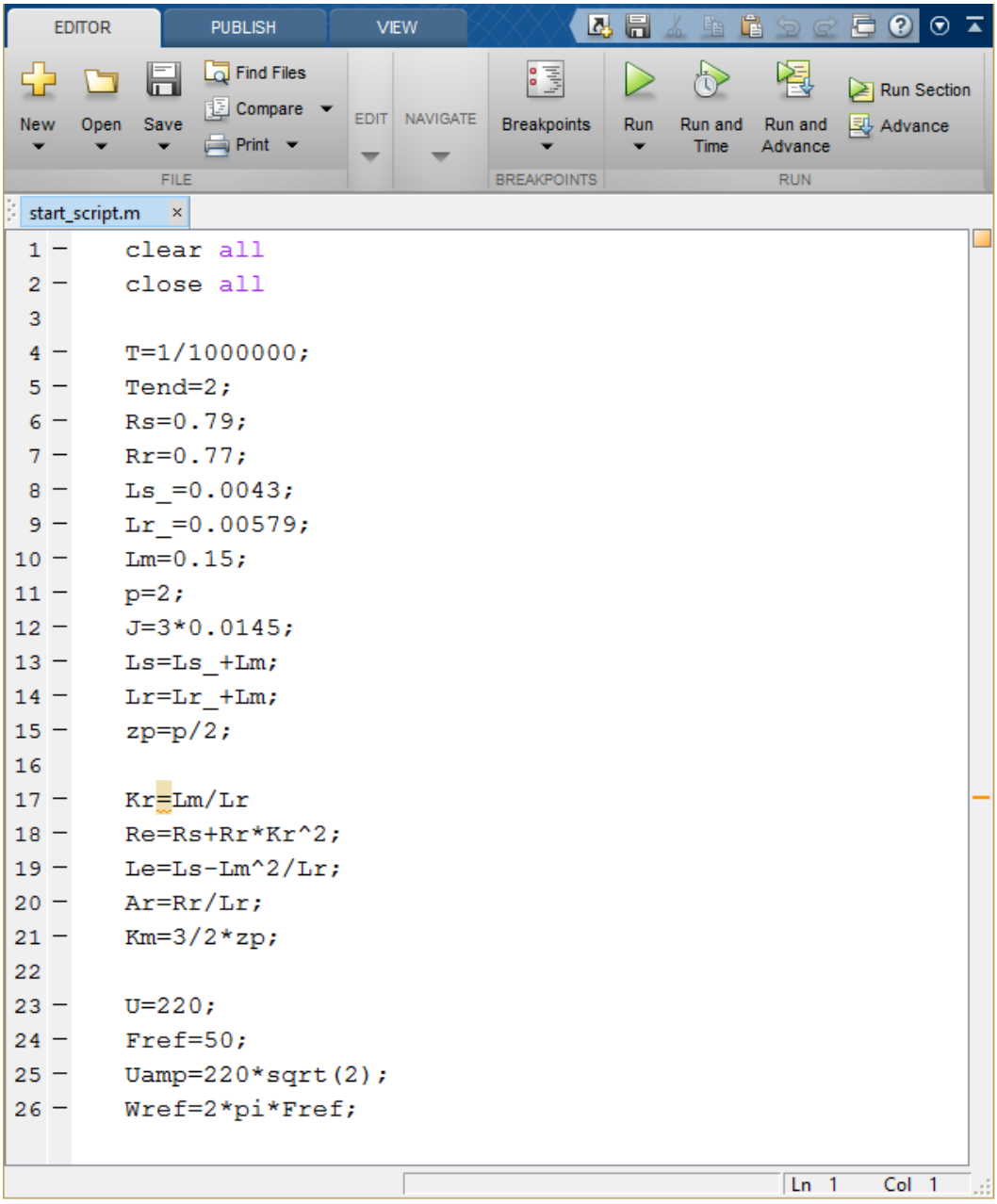

Рисунок 12. Внешний вид программного М-файла.

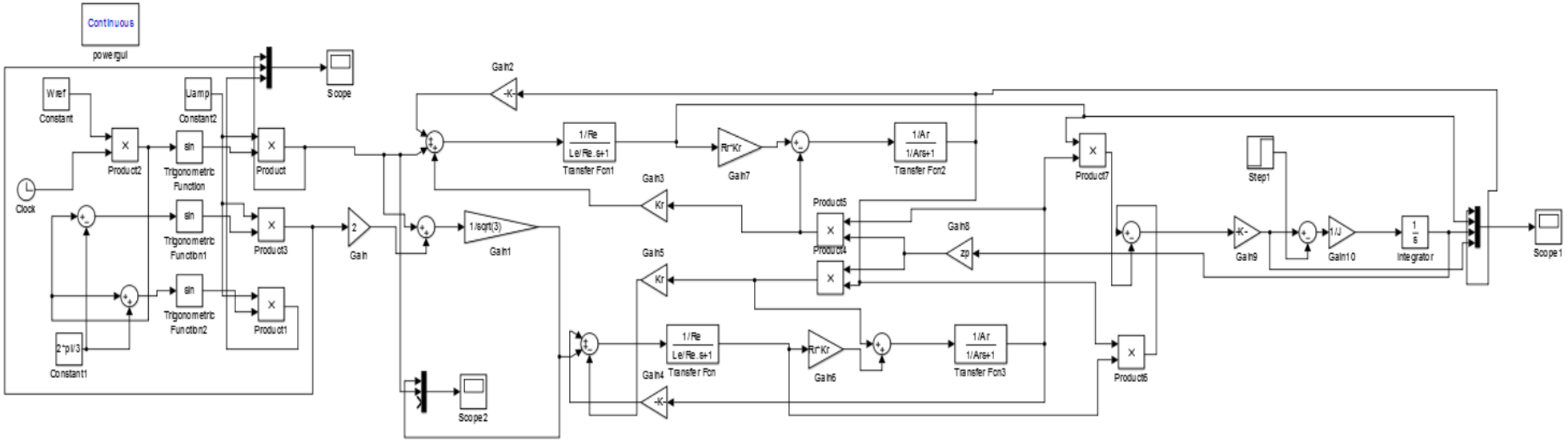

Рисунок 13. Структурная схема имитационной модели АД в приложении *Simulink.*

В результате моделирования, получаем переходный процесс для двигателя (рисунок 14).

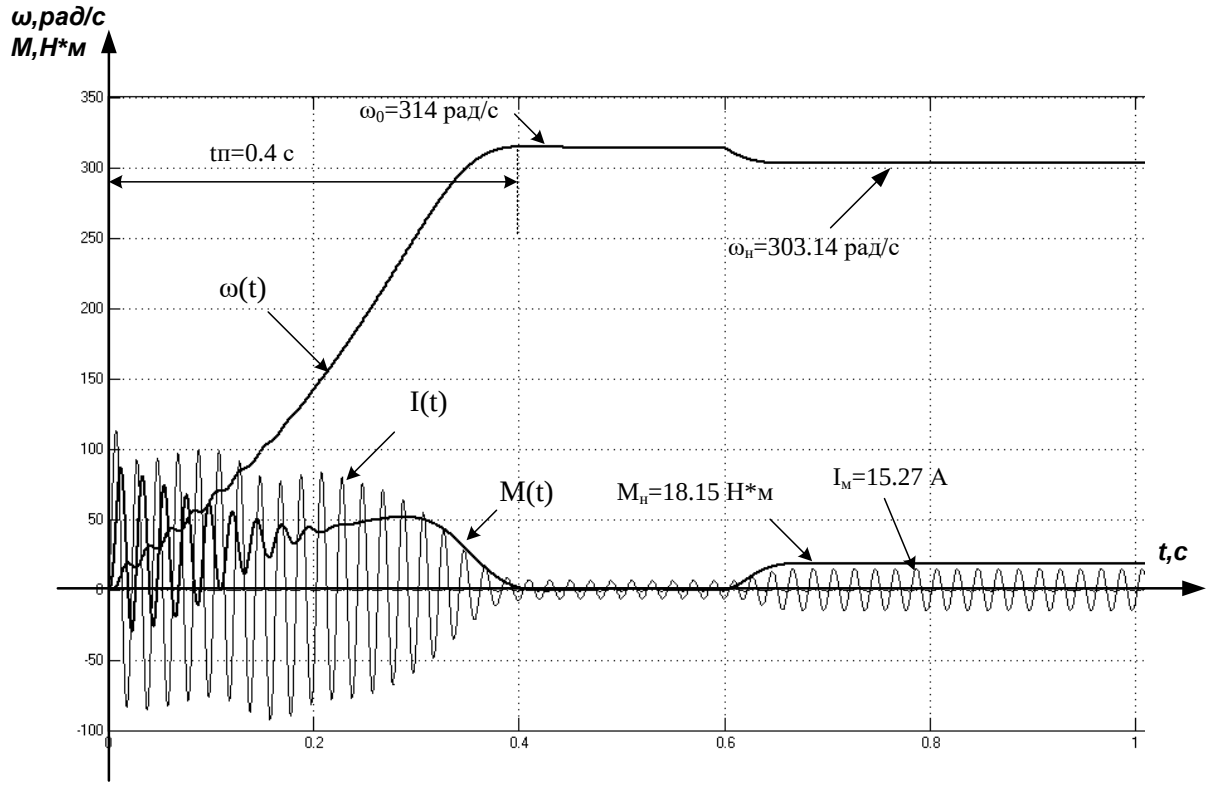

Рисунок 14. Переходные процессы двигателя для неподвижной модели.

На диаграмме можно увидеть, что значение характеристик переходного процесса соответствует расчетным значениям. Из этого можно сделать вывод, что данная модель адекватна и может быть использована для дальнейшей работы.

3.2 Модель АД во вращающейся системе координат

Для разработки системы управления, требуется создать модель во вращающейся системы координат. Это обусловлено тем, что модель в неподвижной системе будет обладать большим количеством обратных связей, что затруднит дальнейшую разработку системы управления. На базе вращающейся модели будут созданы все регуляторы и все контуры управления. Структурная блок схема для вращающейся модели представлена на рисунке 15.

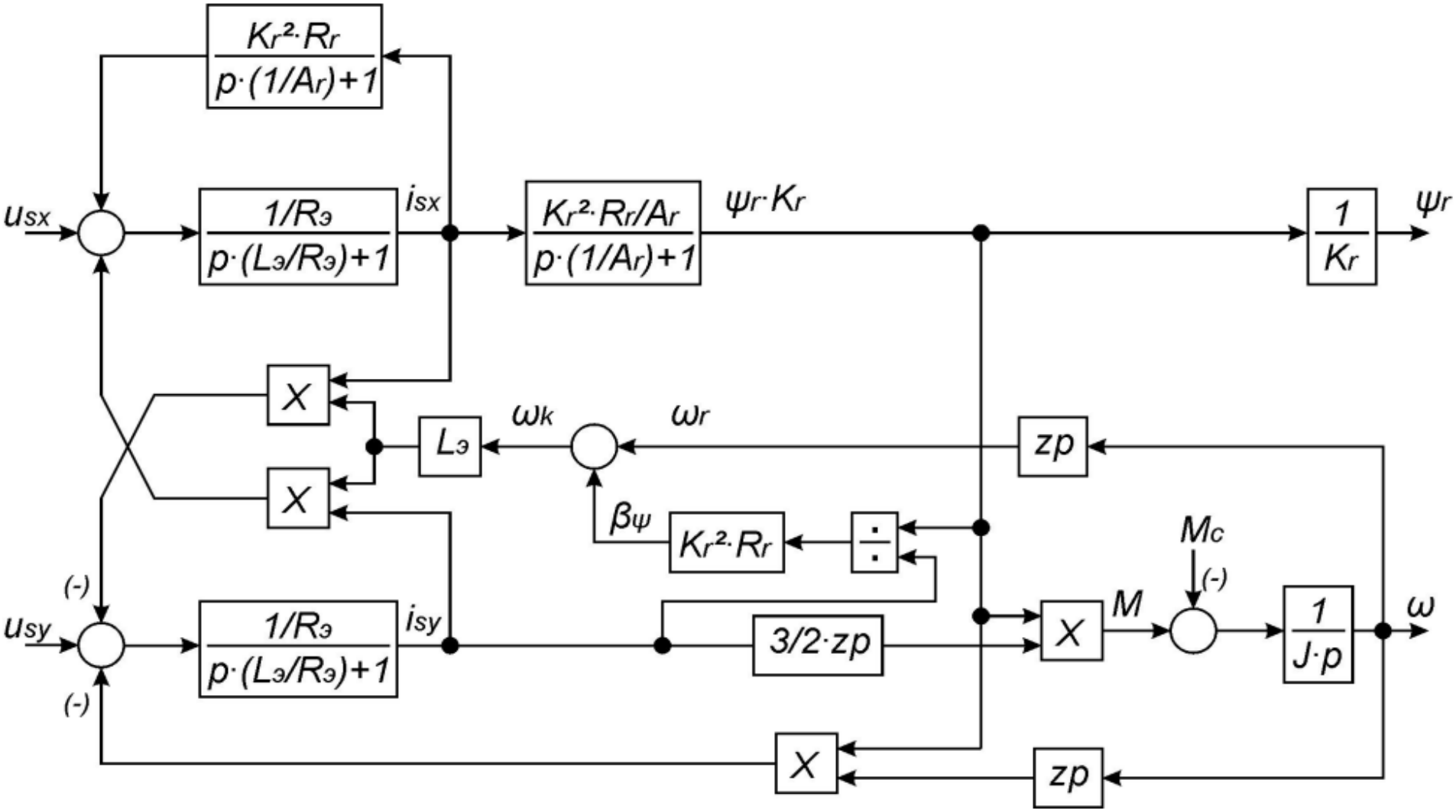

Рисунок 15. Структурная схема АД во вращающейся системе координат с ориентацией по направлению вектора потокосцепления.

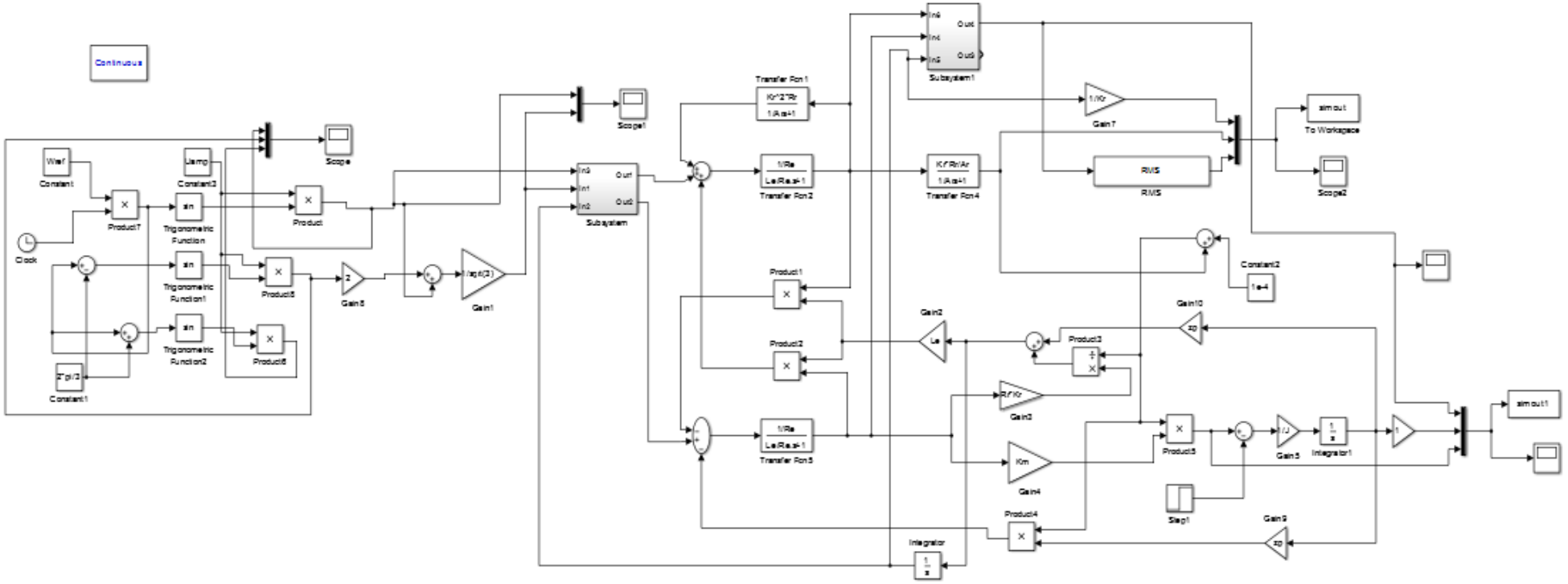

Рисунок 16. Имитационная модель АД во вращающейся системе координат с ориентацией по направлению вектора потокосцепления в среде *Matlab*.

На основании структурной схемы модели АД была собрана модель в среде *Matlab* (рисунок 16). В результате моделирования, получаем переходный процесс для АД (рисунок 17).

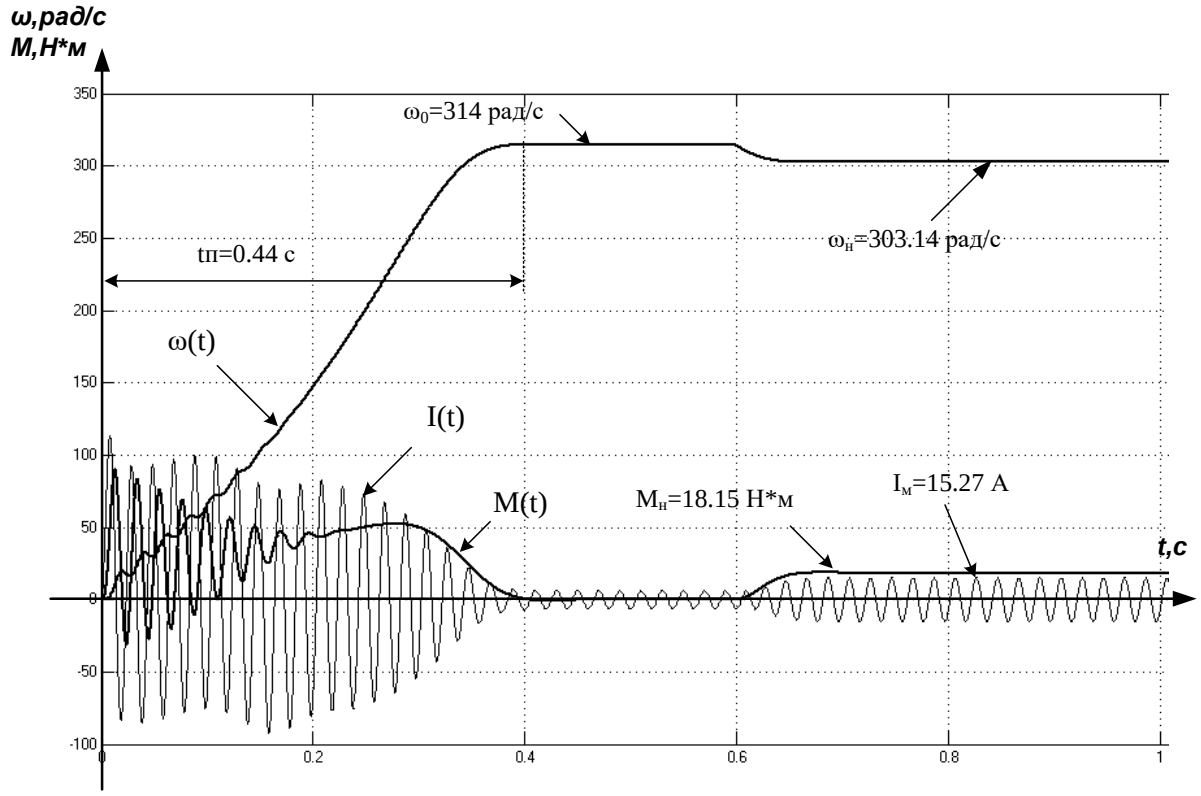

Рисунок 17. Переходные процессы двигателя для вращающейся модели.

Сравнивая рисунки 14 и 17, делаем вывод, что они абсолютно идентичны. Это равенство позволяет нам использовать модель во вращающейся системе координат для разработки системы управления фильтрационной установки бассейна.

4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ.

Векторное управление частотно-регулируемого асинхронного электропривода связано как с изменением частоты и текущих значений переменных АД, так и со взаимной ориентацией их векторов в полярной или декартовой системе координат. За счет регулирования амплитудных значений переменных и углов между их векторами обеспечивается полное управление АД как в статике, так и в динамике, что дает заметное улучшение качества переходных процессов по сравнению со скалярным управлением. Именно этот факт и является определяющим при выборе систем с векторным управлением.

Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного двухзонного электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 18.

Даная схема состоит из 4 контуров управления:

1) Контур управления составляющей вектора тока I_{sx}
2) Контур управления составляющей вектора тока I_{sy}
3) Контур управления потокосцепления ротора
4) Контур управления скоростью вращения ротора

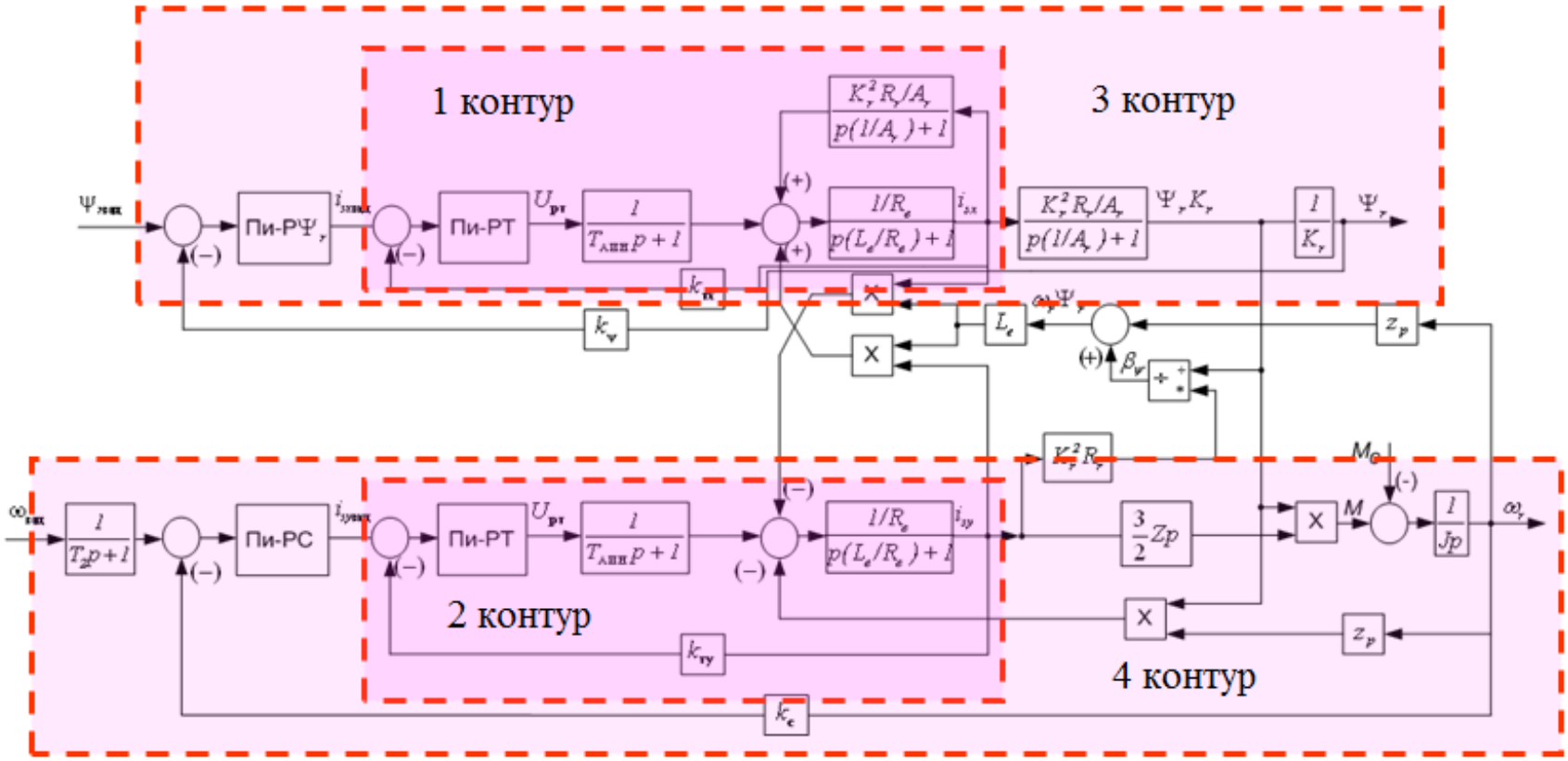

Рисунок 18. Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно- регулируемого асинхронного двухзонного электропривода с векторным управлением.

4.1 Оптимизация контуров регулирования.

4.1.1 Контур управления составляющей вектора тока I_{sx}.

Структурная схема контура тока с инерционной обратной связью приведена на рисунке 19.

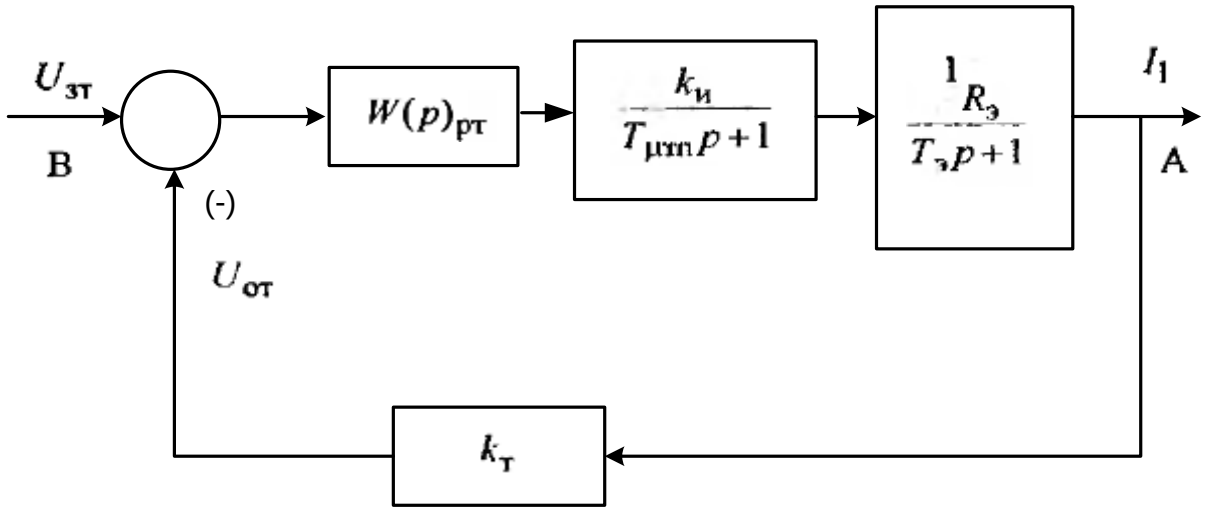

Рисунок 19. Структурная схема контура тока с инерционной обратной связью.

Где:

$U_{ЗТ}$ - напряжение задания на ток, В.

$T_{\mu ТП}$ -малая постоянная времени в прямом канале, с.

$W(p)_{pT}$ -передаточная функция ПИ регулятора тока.

k_T -коэффициент обратной связи по току В/А.

$T_э$ -электромагнитная постоянная времени, с.

$R_э$ -эквивалентное сопротивление, Ом.

$k_И$ -максимальное значение коэффициента усиления преобразователя.

Произведем расчет составляющих контура управления составляющей вектора тока I_{sx}:

Передаточная функция ПИ-регулятора тока:

$$W(p)_{pT} = k_{pT} \cdot \frac{T_{pT} \cdot p + 1}{T_{pT} \cdot p}$$

Коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_{pT} = \frac{T_э \cdot R_э}{k_И \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\mu Тэ}} = \frac{0.0066 \cdot 1.5038}{31.113 \cdot 0.308 \cdot 2 \cdot 0.0004} = 1.2946$$

$a_T = 2$-коэффициент оптимизации.

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_э = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0.0099}{1.5038} = 0.0066 \text{ с}$$

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя

$$k_И = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1фн}}{U_{уп.макс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31.113$$

Принимаем $U_{уп.макс} = 10 \text{ В}$

Эквивалентная постоянная времени преобразователя:

$$T_И = T_{\mu ТП} = \frac{2}{f_{шим}} = \frac{2}{5000} = 0.0004 \text{ с}$$

где $f_{шим}$-несущая частота инвертора, Гц. Принимаем равную 5000 Гц.

Малая постоянная времени в прямом канале:

$T_{\mu ТП}$ принять $T_{\mu ТП} = T_И = 0.0004 \text{ с}$

Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура:

$T_{\mu Тэ} = T_{\mu ТП} = 0.0004 \text{ с}.$

Постоянная времени регулятора тока:

$T_{pT} = T_э = 0.0066 \text{ с}$

Коэффициент обратной связи по току:

$$k_T = \frac{U_{зТ.макс}}{I_{1умакс}} = \frac{10}{32.4} = 0.308$$

принимаем $U_{зТ.макс} = 10 \text{ В}$, $I_{1умакс} = 3 \cdot I_Н = 3 \cdot 10.8 = 32.4 \text{ А}.$

На основании выше приведенных расчетов и структурной схемы производим сбор контура управления составляющей вектора тока I_{sx} в среде *Matlab Simulink* (рисунок 20).

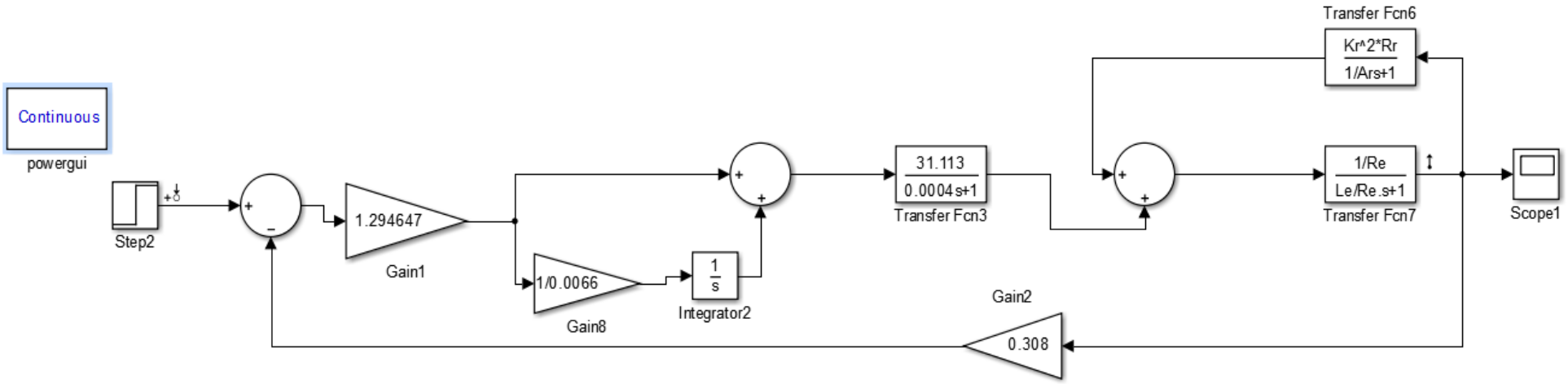

Рисунок 20. Имитационная модель управления составляющей контура тока I_{sx} в среде *Matlab Simulink.*

Чтобы оценить правильность всех расчетов, нужно провести сравнение ожидаемых показателей качества замкнутого контура тока по управлению без фильтра на входе с действительными. Ожидаемые показатели для контура будут:

1) Установившаяся ошибка $\Delta l_{уст} = 0;$
2) Полоса пропускания по фазе $\omega_{П}^{(ф)} \approx \frac{0.9}{T_{\mu ТП}} = \frac{0.9}{0.0004} = 2250 \frac{рад}{с}$
3) Полоса пропускания по модулю $\omega_{П}^{(м)} = \omega_{П}^{(ф)}$
4) Перерегулирование $\sigma \approx 6.7\%$
5) Время первого и окончательного вхождения в 5% зону при отработке ступенчатого задания $t_{ру1}^{(5)} \approx 2.75 \cdot T_{\mu ТП} = 2.75 \cdot 0.0004 = 0.0011, с$

$t_{ру2}^{(5)} \approx 6 \cdot T_{\mu ТП} = 6 \cdot 0.0004 = 0.0024, с$

Действительные показатели качества будут получены из характеристики переходного процесса (рисунок 21) и характеристик ЛАЧХ и ЛФЧХ(рисунок 22).

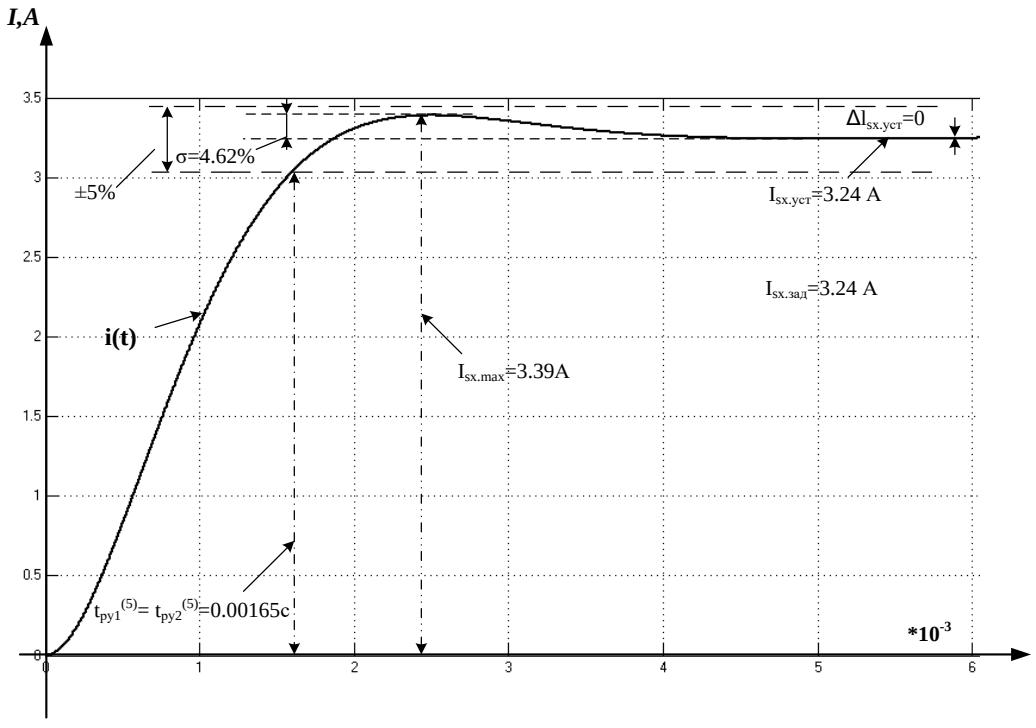

Рисунок 21. Характеристика переходного процесса контура тока I_{sx} полученная в среде *Matlab Simulink.*

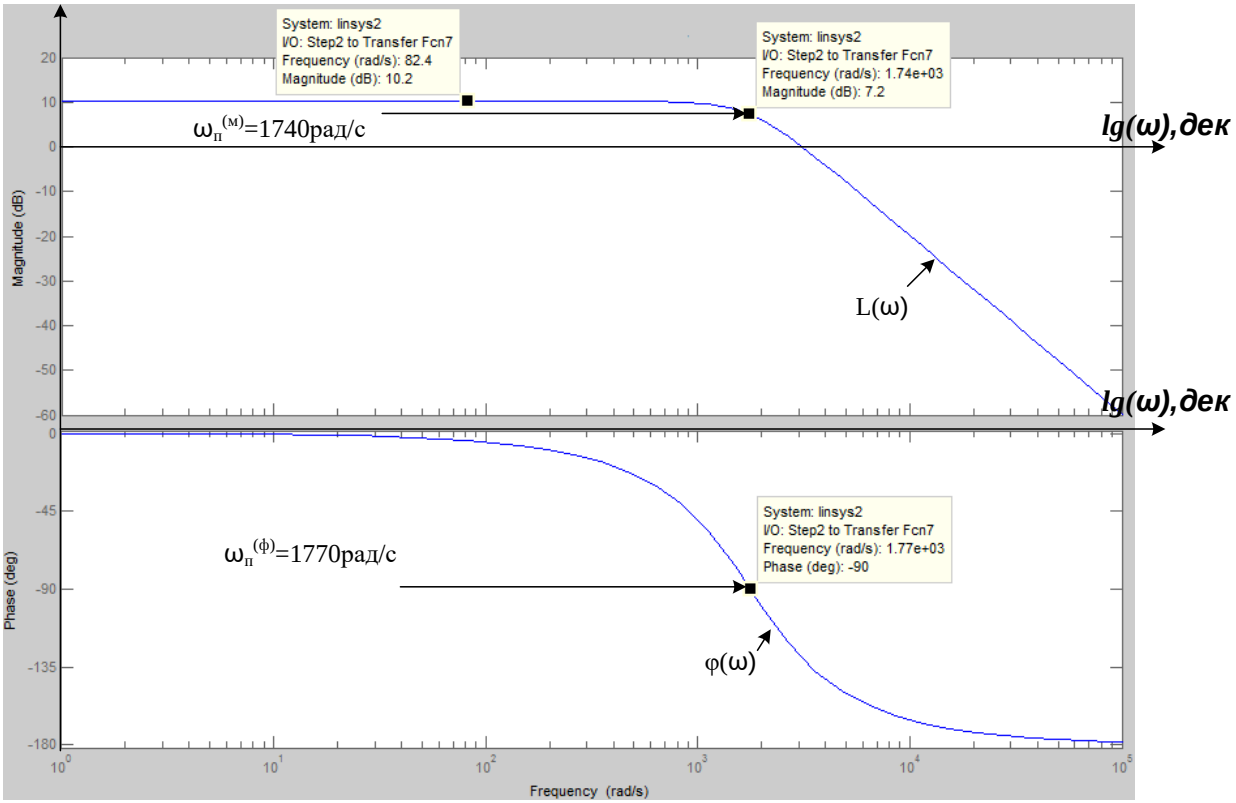

Рисунок 21. ЛАЧХ и ЛФЧХ характеристики контура тока тока I_{sx} полученные в среде *Matlab Simulink.*

Полученные расчетные и действительные данные показателей качества занесем в таблицу 5.

Таблица 5. Ожидаемые и действительные показатели качества контура тока I_{sx}

$\Delta I_{уст}$,А	$\omega_{П}^{(ф)}$,рад/с	$\omega_{П}^{(м)}$,рад/с	σ,%	$t_{ру1}^{(5)}$,с	$t_{ру2}^{(5)}$,с
Ожидаемые показатели качества					
0	2250	2250	6.7	0.0011	0.0024
Действительные показатели качества					
0	1770	1740	4.62	0.00165	0.00165

Полученные показатели качества близкие к расчетным, что подтверждает правильность оптимизации контура.

4.1.2 Контур управления составляющей вектора тока I_{sy}.

Для контура управления составляющей вектора тока I_{sy} структурная блок схема и расчетные показатели качества останутся все те же ,что для контура с оставляющей вектора тока I_{sx}. Поэтому сразу же перейдем к определению показателей качества полученных опытным путем. Имитационная модель представлена на рисунке 24.

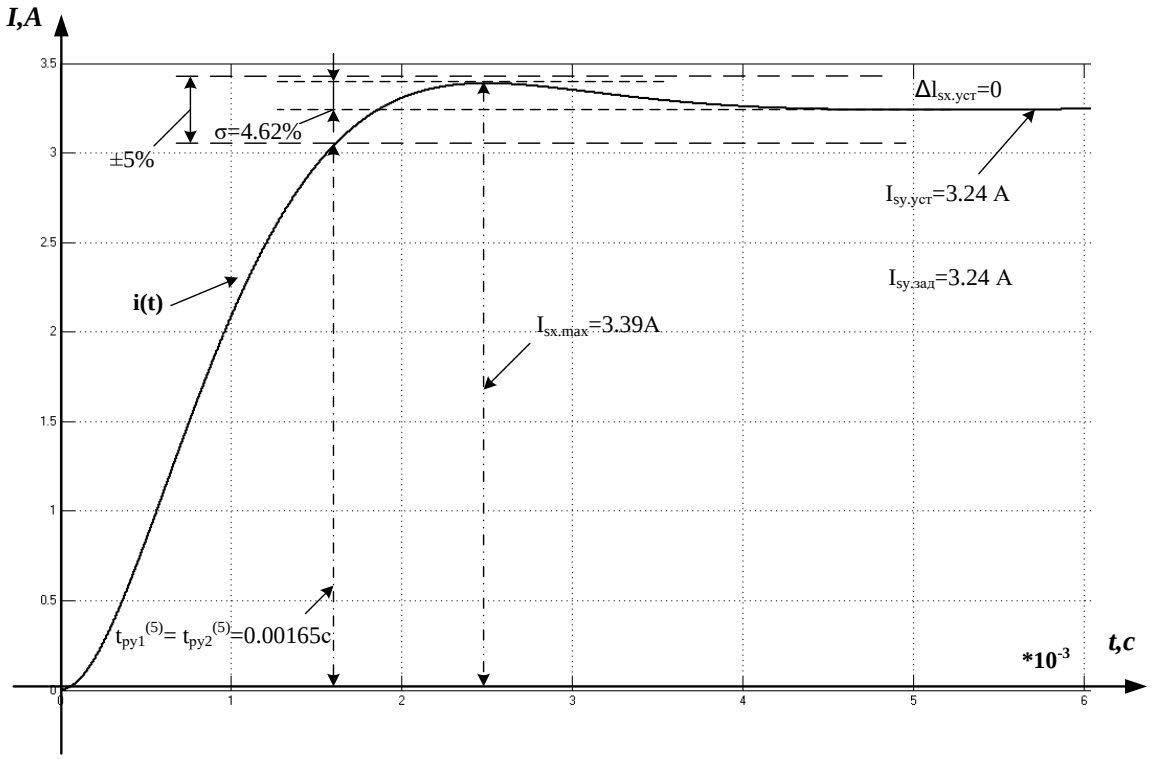

Рисунок 22. Характеристика переходного процесса контура тока I_{sy} полученная в среде *Matlab Simulink.*

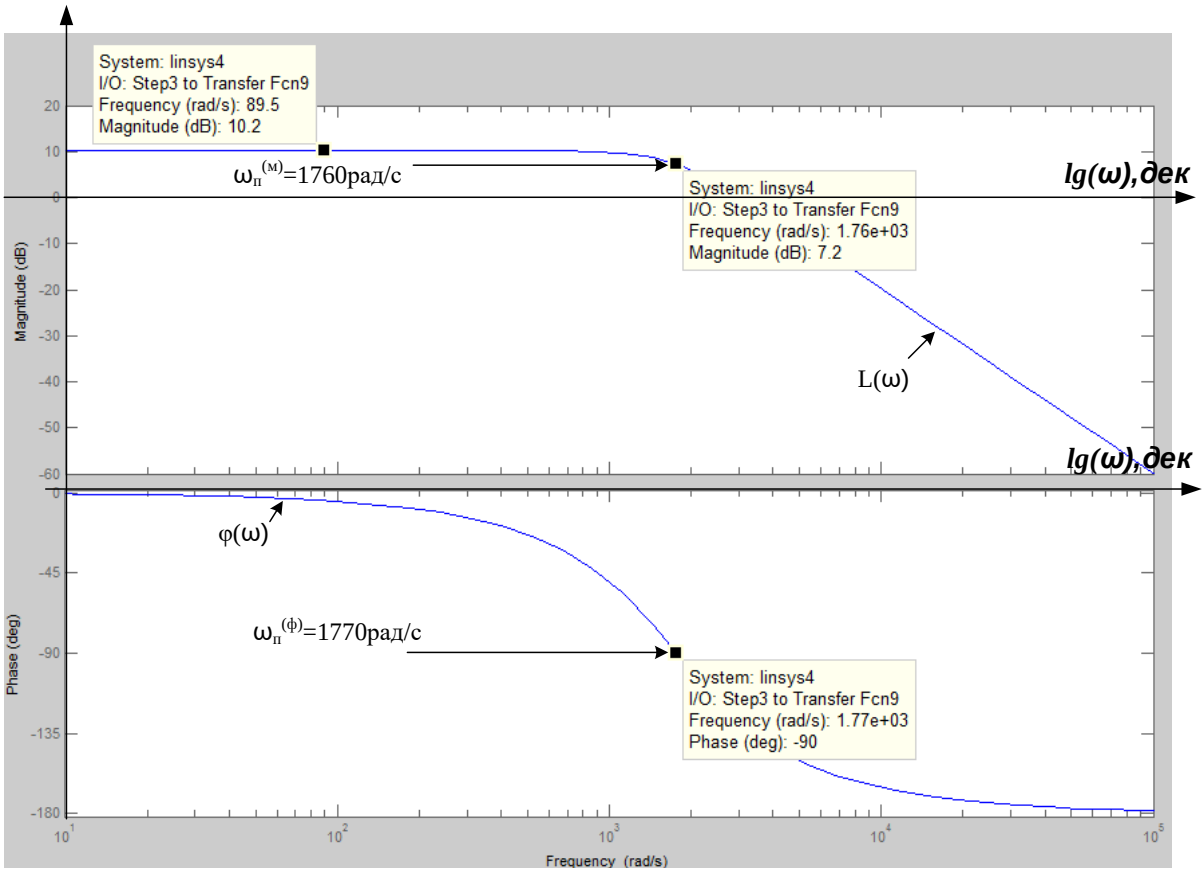

Рисунок 23. ЛАЧХ и ЛФЧХ характеристики контура тока тока I_{sy} полученные в среде *Matlab Simulink.*

Полученные расчетные и действительные данные показателей качества занесем в таблицу 6.

Таблица 6. . Ожидаемые и действительные показатели качества контура тока I_{sy}

$\Delta I_{уст}$,А	$\omega_{П}^{(ф)}$,рад/с	$\omega_{П}^{(м)}$,рад/с	σ,%	$t_{ру1}^{(5)}$,с	$t_{ру2}^{(5)}$,с
Ожидаемые показатели качества					
0	2250	2250	6.7	0.0011	0.0024
Действительные показатели качества					
0	1770	1760	4.62	0.00165	0.00165

Полученные показатели качества близкие к расчетным, что подтверждает правильность оптимизации контура.

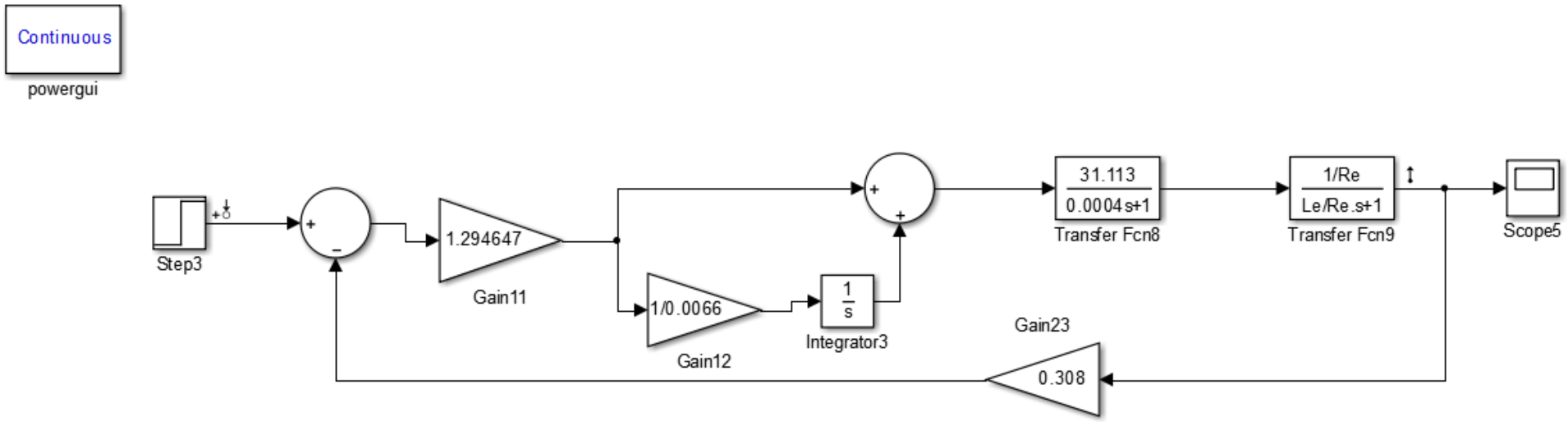

Рисунок 24. Имитационная модель управления составляющей контура тока I_{sy} в среде *Matlab Simulink.*

4.1.3 Контур потокосцепления

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка.

$$W(p)_{замТ} \approx \frac{\frac{1}{k_T}}{T_T \cdot p + 1}$$

Где $T_T = a_T \cdot T_{\mu Тэ} = a_T \cdot T_{\mu ТП} = 2 \cdot 0.0004 = 0.0008$с- эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Структурная схема контура потокосцепления с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором приведена на рисунке 25.

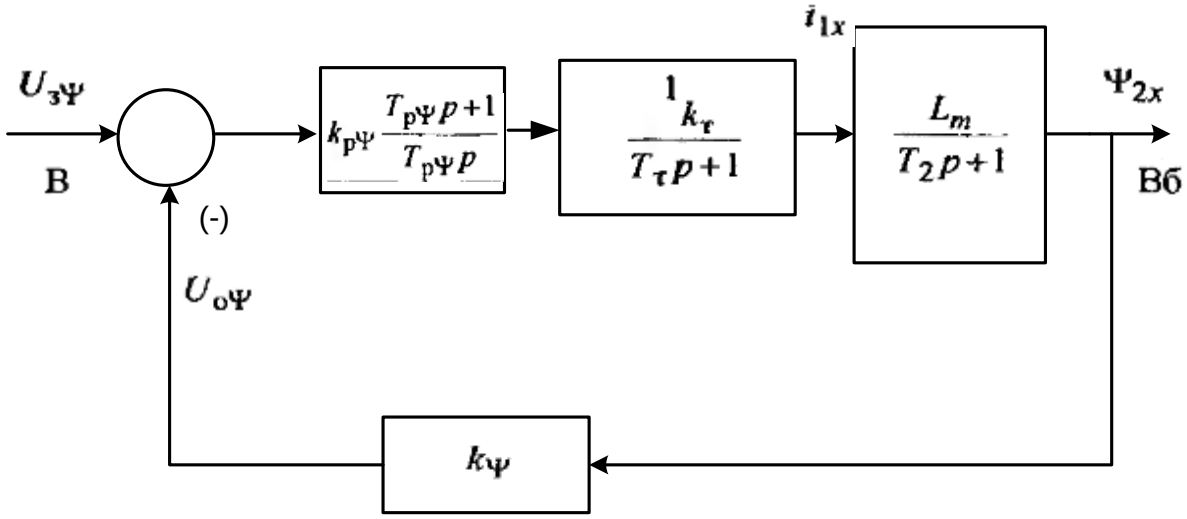

Рисунок 25. Структурная схема контура потокосцепления с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором.

Где:

$U_{з\Psi}$ - напряжение задания на потокосцепление, В.

$T_{\mu ТП}$ -малая постоянная времени в прямом канале, с.

$W(p)_{р\psi}$ -передаточная функция ПИ регулятора потокосцепления.

k_Ψ -коэффициент обратной связи по потокосцеплению В/Вб.

$T_{р\Psi}$ -постоянная времени регулятора потокосцепления

Произведем расчет составляющих контура управления потокосцеплением:

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления:

$$W(p)_{p\Psi} = k_{p\Psi} \cdot \frac{T_{p\Psi} \cdot p + 1}{T_{p\Psi} \cdot p}$$

Коэффициент усиления регулятора потокосцепления:

$$k_{p\psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_\Psi} \cdot \frac{1}{a_T \cdot T_T} = \frac{0.202 \cdot 0.308}{0.15 \cdot 10.537 \cdot 2 \cdot 0.0016} = 24.602$$

$a_T = 2$-коэффициент оптимизации.

Коэффициент обратной связи по потокосцеплению:

$$k_\Psi = \frac{U_{з\Psi max}}{\Psi_{2кн}} = \frac{10}{0.949} = 10.537$$

Где $U_{з\Psi max}$ принять=10 В, Вб

$$M_{эм.н} = \frac{3 \cdot U^2_{1фн} \cdot R_2^{`}}{\omega_0 \cdot s_н \cdot \left[ x^2_{кн} + (R_1 + \frac{R_2^{`}}{s_н})^2 + (\frac{R_1 \cdot R_2^{`}}{s_н \cdot x_\mu})^2 \right]} =$$

$$\frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0.77}{314.14 \cdot 0.035 \left[3.233^2 + (0.79 + \frac{0.77}{0.035})^2 + (\frac{0.79 \cdot 0.77}{0.035 \cdot 48.777})^2 \right]} = 19.188 Н \cdot м$$

Постоянная времени регулятора потокосцепления:

$$T_{p\Psi} = T_2 = \frac{1}{A_r} = \frac{1}{4.9426} = 0.2023 \text{ с}$$

Где $A_r = \frac{R_2^{`}}{L_2} = \frac{0.77}{0.1558} = 4.9426$ Ом/Гн

На основании выше приведенных расчетов и структурной схемы производим сбор контура управления составляющей потокосцепления в среде *Matlab Simulink* (рисунок 26).

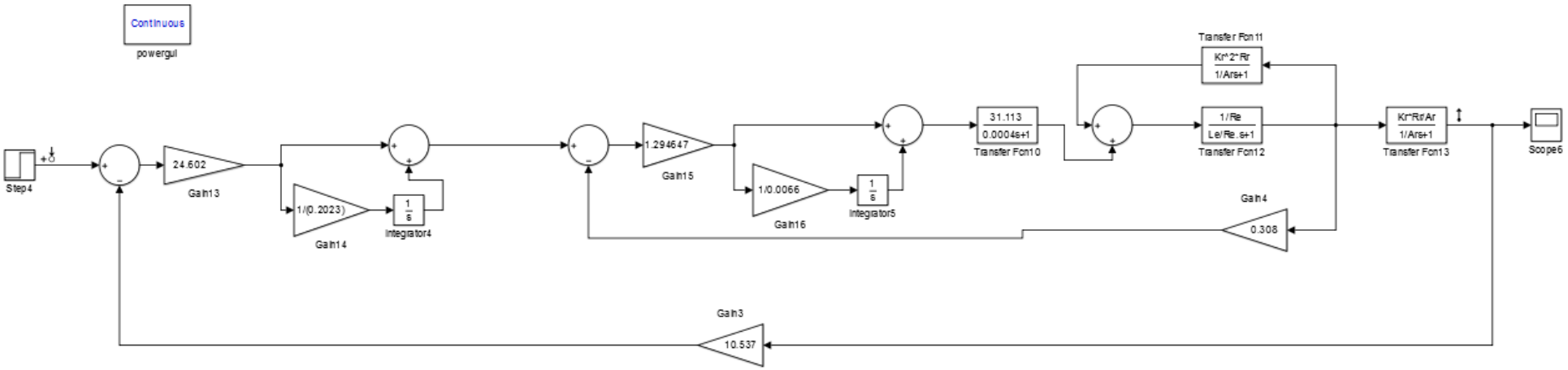

Рисунок 26. Имитационная модель управления составляющей контура потокосцепления в среде *Matlab Simulink.*

Произведем расчет ожидаемых показателей качества для контура регулирования потокосцепления.

Ожидаемые показатели качества для контура потокосцепления будут:

1) Установившаяся ошибка $\Delta\Psi_{r.уст} = 0$;
2) Полоса пропускания по модулю $\omega_{П}^{(м)} \approx \frac{(0.71 \div 0.9)}{T_T} = \frac{(0.71 \div 0.9)}{0.0008} = 887.5 \div 1125 \frac{рад}{с}$;
3) Полоса пропускания по фазе $\omega_{П}^{(ф)} \approx \omega_{П}^{(м)}$;
4) Время первого и окончательного вхождения в пятипроцентную зону $t_{ру1}^{(5)} = t_{ру2}^{(5)} \approx (4.1 \div 2.75) \cdot T_T = (4.1 \div 2.75) \cdot 0.0008 = 0.00328 \div 0.0022, с$;
5) Перерегулирование $\sigma = (4.3 \div 6.7)\%$;

Определяем действительные показатели качества из характеристик переходного процесса контура потокосцепления (рисунок 27) и его ЛАЧХ и ЛФЧХ(рисунок 28).

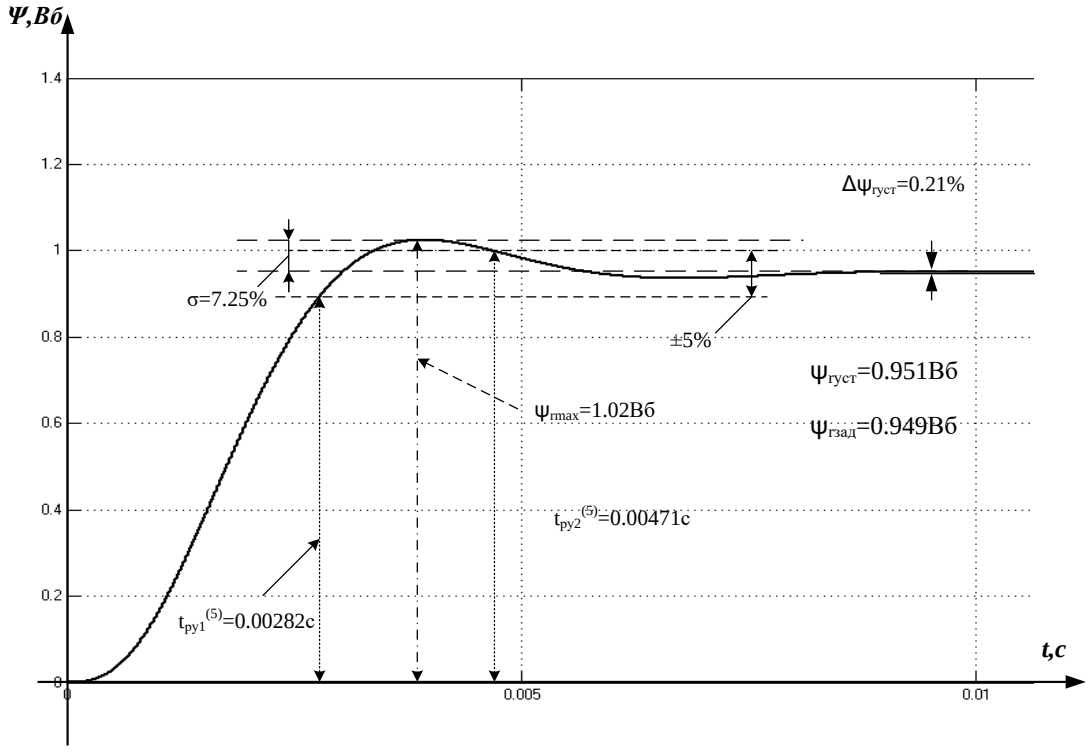

Рисунок 27. Характеристика переходного процесса контура потокосцепления полученная в среде *Matlab Simulink.*

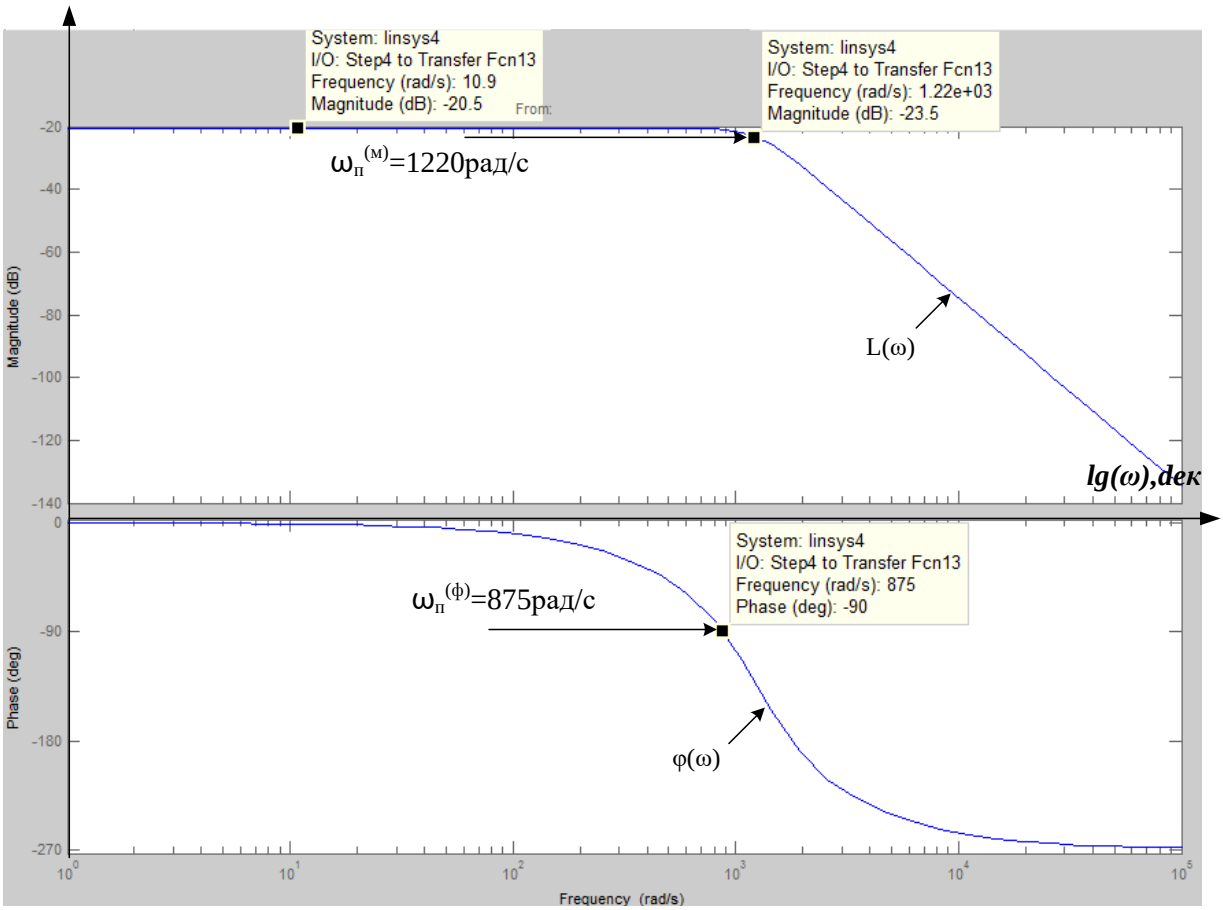

Рисунок 28. ЛАЧХ и ЛФЧХ характеристики контура потокосцепления полученные в среде *Matlab Simulink.*

Полученные расчетные и действительные данные показателей качества занесем в таблицу 7.

Таблица 7. Ожидаемые и действительные показатели качества контура потокосцепления.

$\Delta\Psi_{уст}$,А	$\omega_{П}^{(ф)}$,рад/с	$\omega_{П}^{(м)}$,рад/с	σ,%	$t_{ру1}^{(5)}$,с	$t_{ру2}^{(5)}$,с
Ожидаемые показатели качества					
0	887.5÷1125	887.5÷1125	6.7	0.00328	0.00328
Действительные показатели качества					
0	875	1220	7.25	0.00282	0.00471

Полученные показатели качества близкие к расчетным, что подтверждает правильность оптимизации контура.

4.1.4 Контур скорости

При оптимизации контура скорости внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией первого порядка.

$$W(p)_{зам.T} \approx \frac{\frac{1}{k_T}}{T_T \cdot p + 1}$$

Где:

Эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока, с

$$T_T = a_T \cdot T_{\mu Tэ} = a_T \cdot T_{\mu TП} = 2 \cdot 0.0004 = 0.0008\,\text{с}$$

Структурная схема для исследования контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором приведена на рисунке 29.

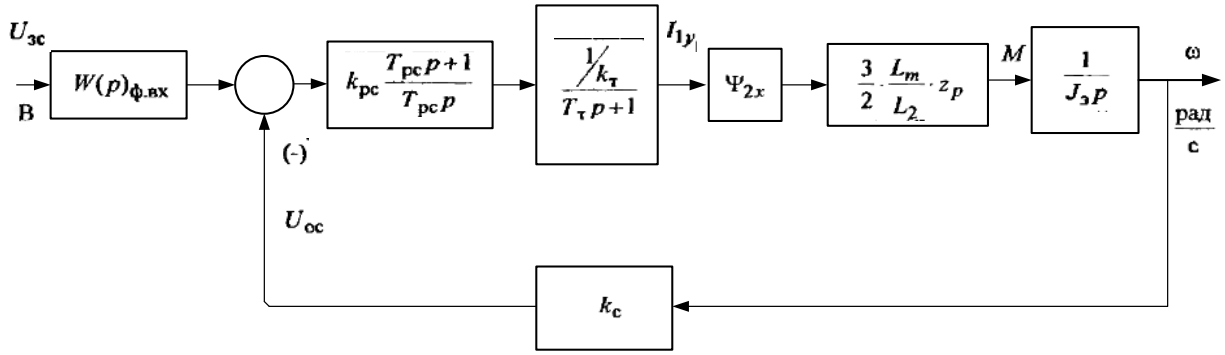

Рисунок 29. Структурная схема контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором.

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости:

$$W(p)_{рс} = k_{рс} \cdot \frac{T_{рс} \cdot p + 1}{T_{рс} \cdot p}$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора скорости определяется по выражению:

$$k_{рс} = \frac{J_э \cdot k_T}{\Psi_{2x} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot k_с} \cdot \frac{1}{a_с \cdot T_T} = \frac{3 \cdot 0.0145 \cdot 0.308}{0.949 \cdot 1.5 \cdot \frac{0.15}{0.1558} \cdot 0.033} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0.0008} = 185.15$$

$$T_{рс} = a_c \cdot b_c \cdot T_T = 2 \cdot 2 \cdot 0.0008 = 0.0032 \text{ с}$$

Где $a_c = b_c = 2$-коэффициенты оптимизации.

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$k_c = \frac{U_{зс.макс}}{\omega_{эп.макс}} = \frac{10}{303.14} = 0.033 \text{ В*с/рад}$$

На входе контура достаточно установить один сглаживающий фильтр типа:

$$W(p)_{ф.вх} = \frac{1}{T_{ф.вх2} \cdot p + 1};$$

$$T_{ф.вх2} = b_c \cdot a_c \cdot T_T = 2 \cdot 2 \cdot 0.0008 = 0.0032 \text{ с}$$

На основании вышеприведенных расчетов и структурной схемы собирается имитационная модель контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором (рисунок 32).

Определяем ожидаемые показатели качества для контура скорости:

1) Установившаяся ошибка $\Delta\omega_{уст}=0$;
2) Полоса пропускания по модулю $\omega_п^{(м)} = \frac{(0.5 \div 0.54)}{T_T} = 625 \div 675 \text{ рад/с}$
3) Полоса пропускания по фазе $\omega_п^{(ф)} = \frac{(0.36 \div 0.42)}{T_T} = 450 \div 525 \text{ рад/с}$
4) Перерегулирование $\sigma = (8.1 \div 10)\%$
5) Время первого и окончательного вхождения в пятипроцентную зону

$$t_{ру1}^{(5)} \approx (7 \div 5.8) \cdot T_T = (7 \div 5.5) \cdot 0.0008 = 0.0056 \div 0.00464, c$$

$$t_{ру2}^{(5)} \approx (12 \div 9.5) \cdot T_T = (12 \div 9.5) \cdot 0.0008 = 0.0096 \div 0.0076, c$$

Определяем действительные показатели качества из характеристик переходного процесса контура скорости (рисунок 30) и его ЛАЧХ и ЛФЧХ (рисунок 31).

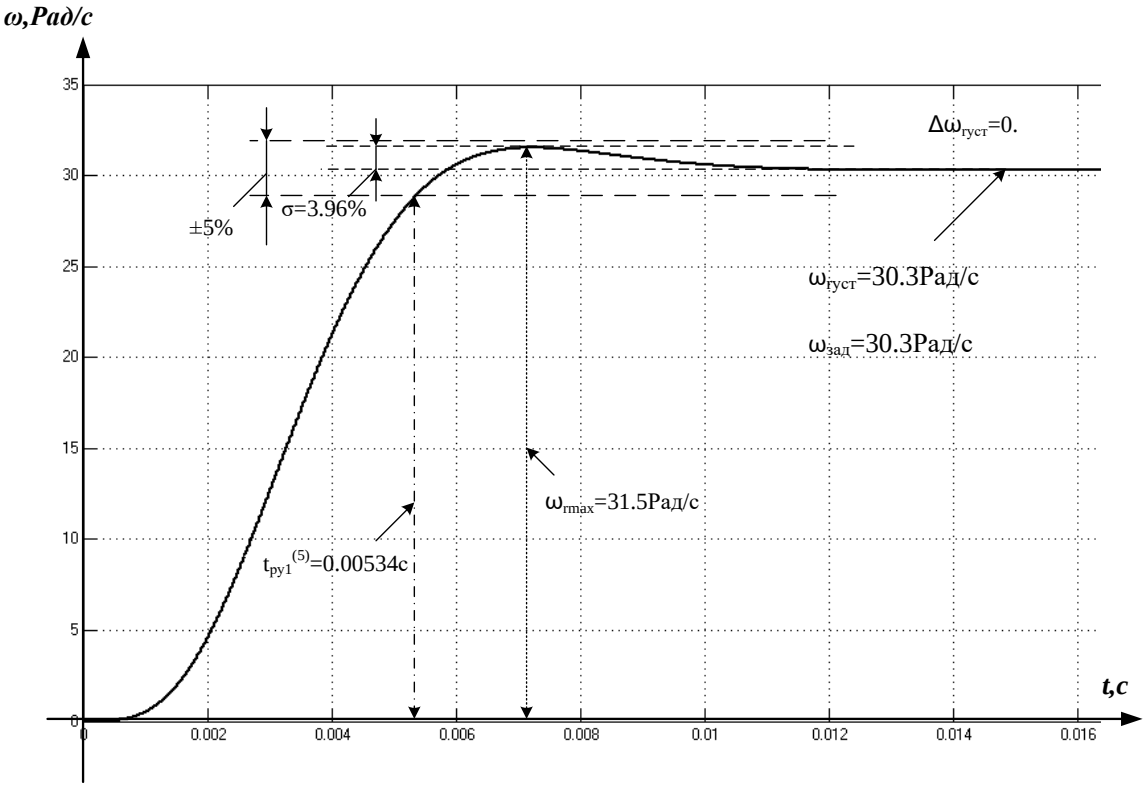

Рисунок 30. Характеристика переходного процесса контура скорости полученная в среде *Matlab Simulink.*

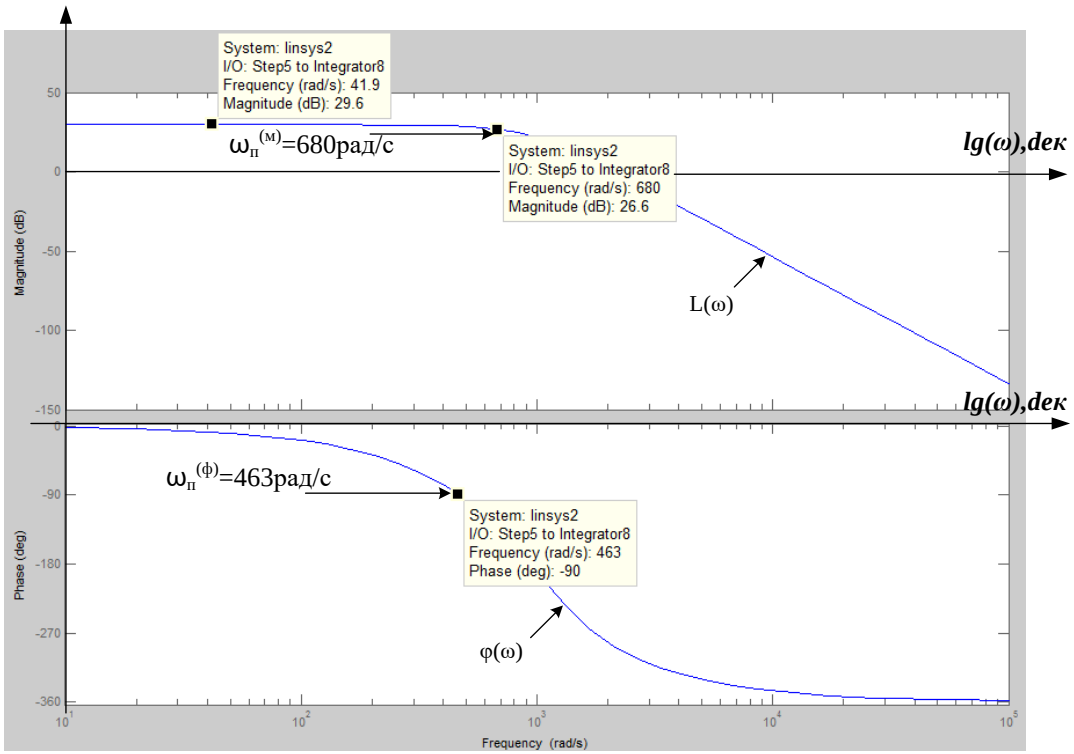

Рисунок 31. ЛАЧХ и ЛФЧХ характеристики контура скорости, полученные в среде *Matlab Simulink.*

Полученные расчетные и действительные данные показателей качества занесем в таблицу 8.

Таблица 8. Ожидаемые и действительные показатели качества контура скорости

$\triangle\omega_{уст}$,А	$\omega_{П}^{(ф)}$,рад/с	$\omega_{П}^{(м)}$,рад/с	σ,%	$t_{ру1}^{(5)}$,с	$t_{ру2}^{(5)}$,с
Ожидаемые показатели качества					
0	$450 \div 525$	$625.5 \div 675$	$8.1 \div 10$	$0.0056 \div 0.00464$	$0.0096 \div 0.0076$
Действительные показатели качества					
0	463	680	3.96	0.00534	0.00534

Полученные показатели качества близкие к расчетным, что подтверждает правильность оптимизации контура.

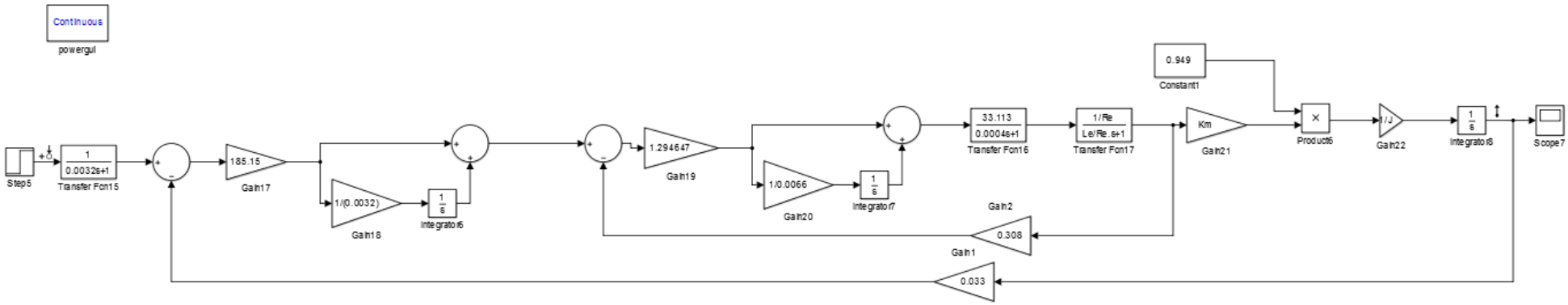

Рисунок 32. Имитационная модель контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором в среде *Matlab Simulink.*

4.2 Общая линейная модель во вращающейся системе координат.

После того как мы получили требуемые результаты оптимизации , производим совместную сборку контуров. Общий вид модели двигателя во вращающейся системе координат с оптимизированными контурами представлен в среде *Matlab Simulink* (рисунок 34). С помощью этой модели получаем переходные процессы по скорости и потокосцеплению.

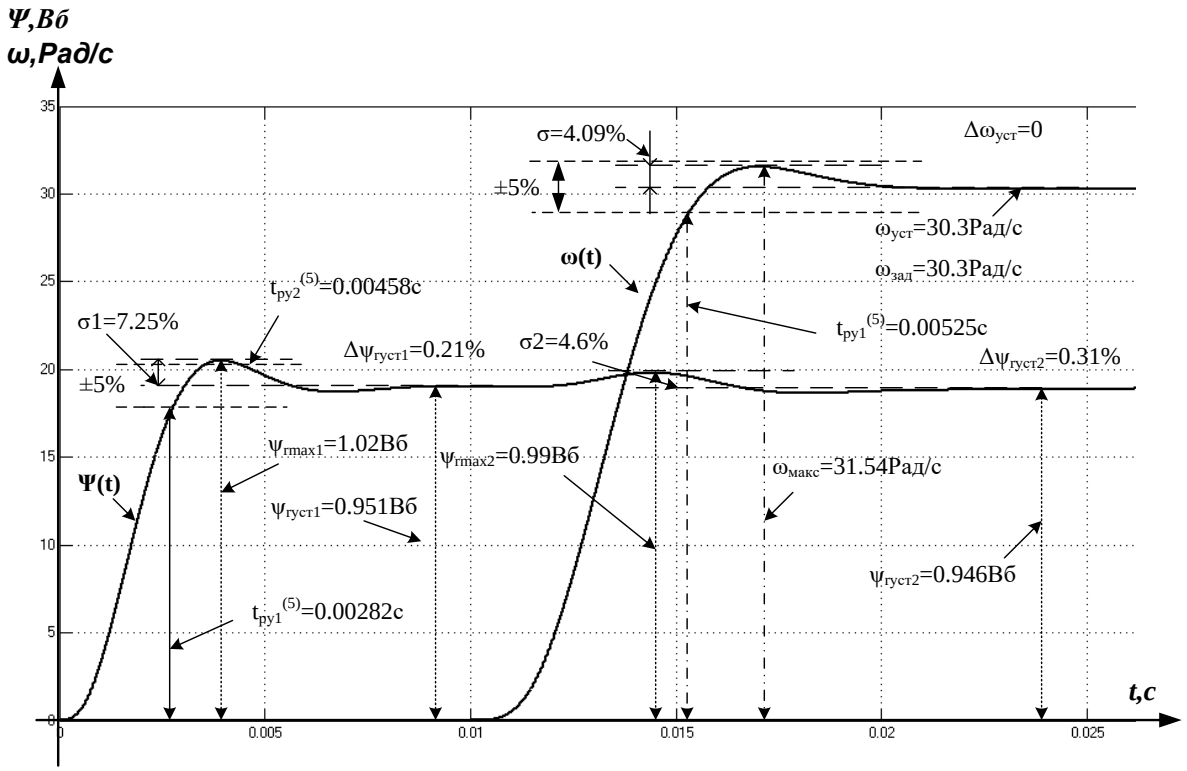

Рисунок 33. Характеристика переходного процесса полной модели во вращающейся системе координат полученная в среде *Matlab Simulink.*

Из данной характеристики видно, что контур скорости оказывает непосредственной влияние на контур потокосцепления. Установившееся значение потокосцепления после включения контура скорости незначительно уменьшилось.

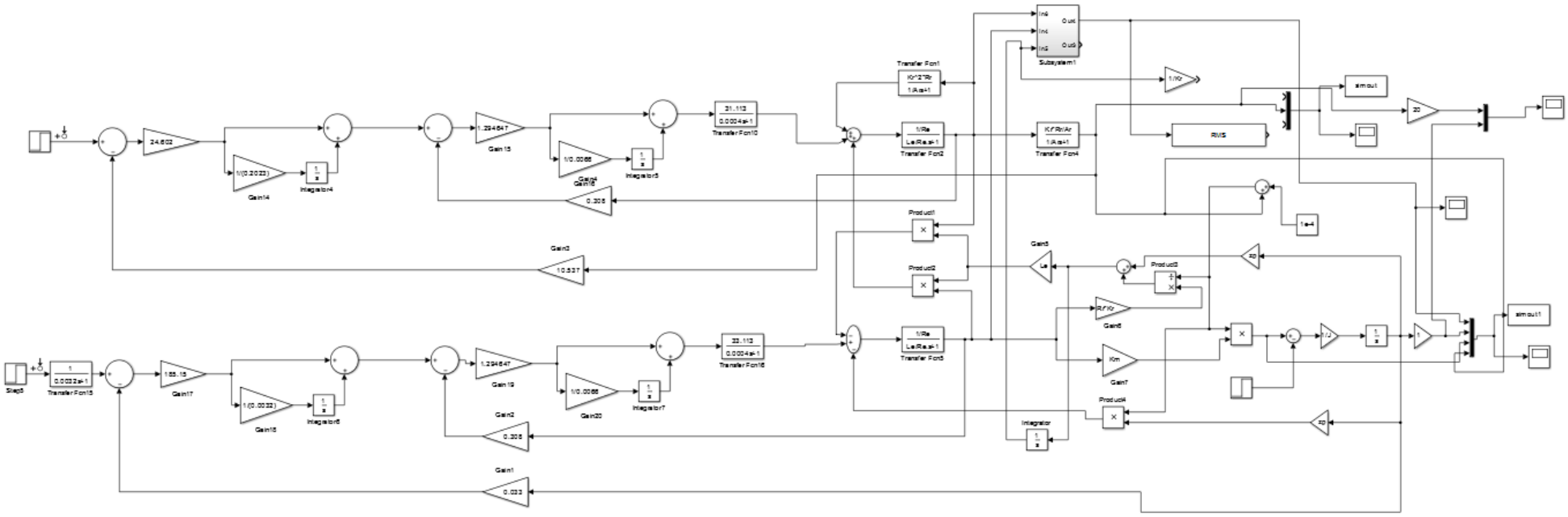

Рисунок 34. Общий вид модели двигателя во вращающейся системе координат с оптимизированными контурами в среде *Matlab Simulink*

4.3 Общая линейная модель в неподвижной системе координат

Так как в разных моделях у нас был использован один и тот же двигатель и система управления спроектирована для них обоих соответственно, то если заменить вращающуюся модель на неподвижную система управления должна не заметить разницы и мы получим практически такие же показатели. Дело в том что неподвижная модель более реальная чем модель спроектированная во вращающейся системе координат поэтому использовать ее в дальнейшем будет правильнее. Произведем замену используя координатные преобразователи Общий вид имитационной модели в неподвижной системе координат представлен на рисунке 36.

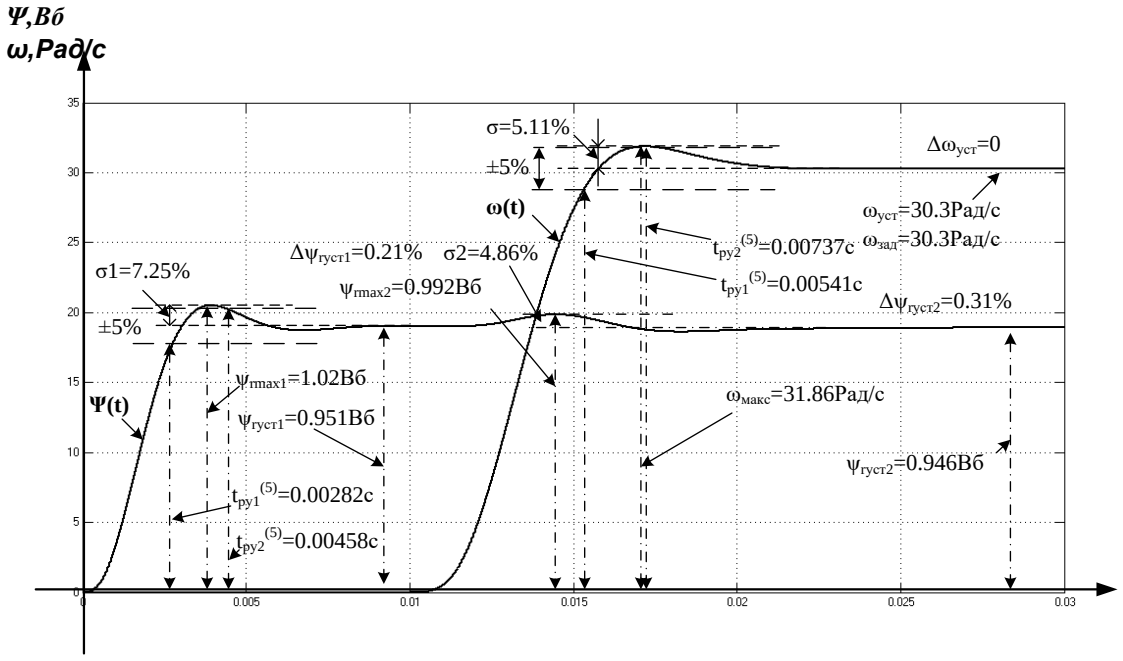

Рисунок 35. Характеристика переходного процесса полной модели в неподвижной системе координат полученная в среде *Matlab Simulink.*

Из данной характеристики видно, что она совсем несущественно отличается от рисунка 33. Это доказывает правильность теории с подменом моделей. Занесем данные обоих экспериментов в таблицу 9 и произведем анализ полученных результатов

Таблица 9. Показатели качества вращающейся модели и неподвижной.

$\Delta\omega_{уст}$, Рад/с	σ,%	$t^{(5)}_{ру1}$,с	$t^{(5)}_{ру2}$,с	$\Delta\Psi_{уст1}$ %,	$\Delta\Psi_{уст2}$ %	σ_1,%	σ_2,%	$t^{(5)}_{ру1}$,с(ψ)	$t^{(5)}_{ру2}$,с(ψ)
Вращающаяся модель									
0	4.09	0.00525	0.00525	0.21	0.31	7.25	4.6	0.00282	0.00458
Неподвижная модель									
0	5.11	0.00541	0.00737	0.21	0.31	7.25	4.86	0.00282	0.00458

После замены произошло незначительное увеличение перерегулирования по скорости в результате чего немного увеличилось время окончательного вхождения в пятипроцентную зону.

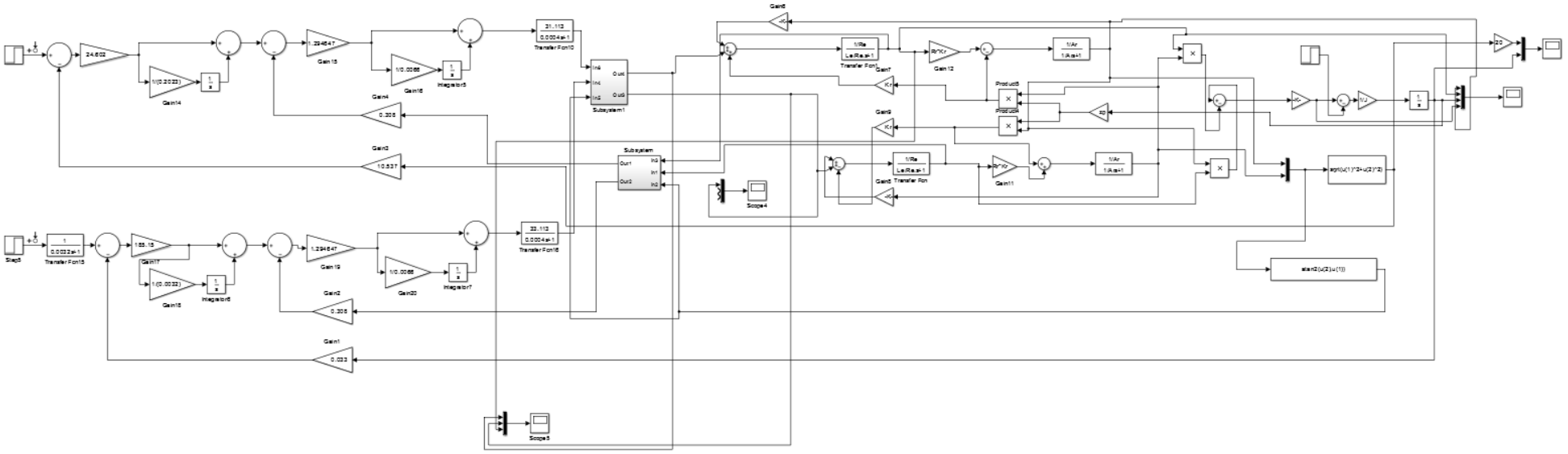

Рисунок 36. Общий вид модели двигателя в неподвижной системе координат с оптимизированными контурами в среде *Matlab Simulink*

5. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА

Для организации качественного управления позиционным или следящим сервоприводом необходимо динамическая регулировка моментного усилия развиваемого на валу приводного двигателя. Только в этом случае будет возможна оптимальная настройка для режимов позиционирования и слежения. Чтобы это обеспечить, необходимо ввести ограничения на выходы регуляторов по току и напряжению. Однако введение ограничений на выходе регуляторов приводит к изменению характера переходных процессов, полученных ранее при оптимизации. Так же для приведения картины переходных процессов к удовлетворительному виду требуются применять коррекцию интегрального насыщения. Интегральное насыщение возникает, когда ПИ или ПИД - регулятор в течении длительного времени должен компенсировать ошибку, лежащую за пределами диапазона управляемой переменной. Поскольку выход регулятора ограничен , ошибку крайне сложно свести к нулю. Из-за этого происходит затягивание времени переходного процесса, увеличение перерегулирования, колебательность. Для коррекции интегрального насыщения воспользуемся схемой приведенной на рисунке 37.

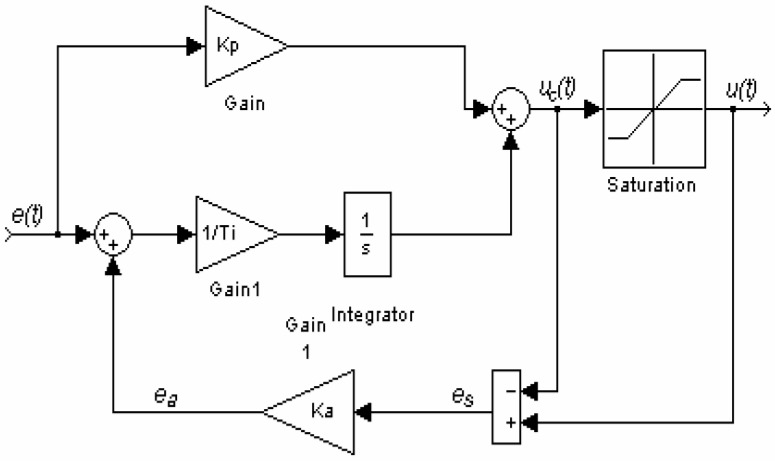

Рисунок 37. Пример коррекции интегрального насыщения реализованной в среде *Matlab Simulink.*

5.1 Ограничение максимального напряжения.

Как говорилось выше необходимо ввести ограничение на выходы регуляторов. Произведем геометрическое разложение вектора максимального напряжения на две составляющие U_x и U_y. Пример разложения приведен на рисунке 38.

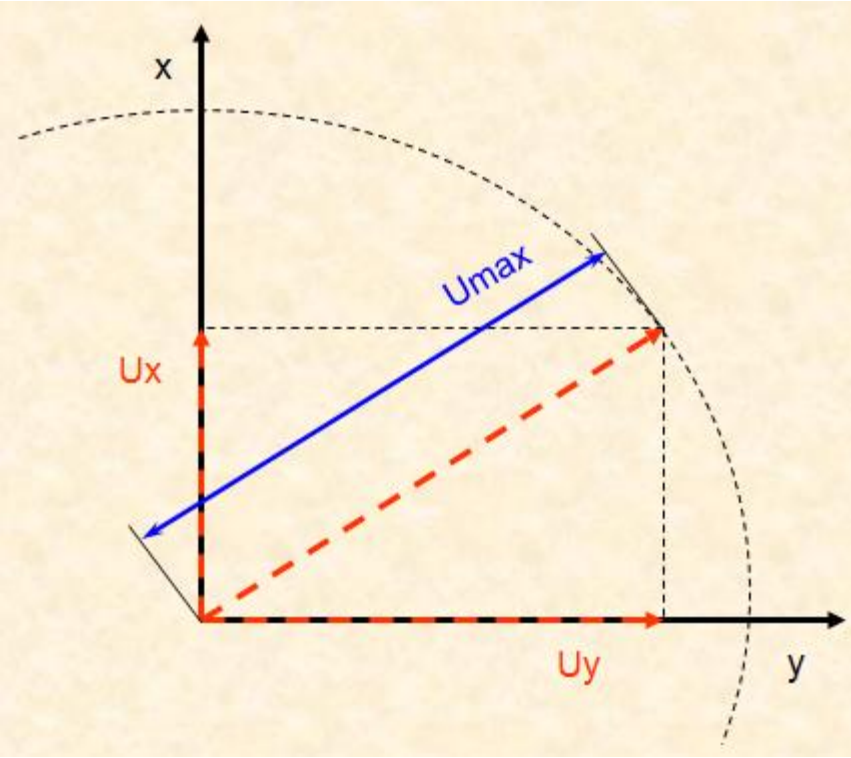

Рисунок 38. Геометрическое разложения вектора максимального напряжения.

Составляющие U_x и U_y отвечают за формирование магнитного потока и момента на валу в асинхронном двигателе соответственно.

Исходя из рисунка 38, можно записать выражение $U_{\max} \geq \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$

$$U_{\max} = 220 \cdot \sqrt{2} = 311.12B$$

Воспользуемся рекомендациями для задания уровня ограничений на выходе регуляторов тока.

Примем:

$$U_x \approx 3.12 \cdot U_{\max}$$
$$U_y \approx 9.5 \cdot U_{\max}$$

5.2 Ограничение максимального тока.

Произведем геометрическое разложение вектора максимального напряжения на две составляющие I_x и I_y. Пример разложения приведен на рисунке 39.

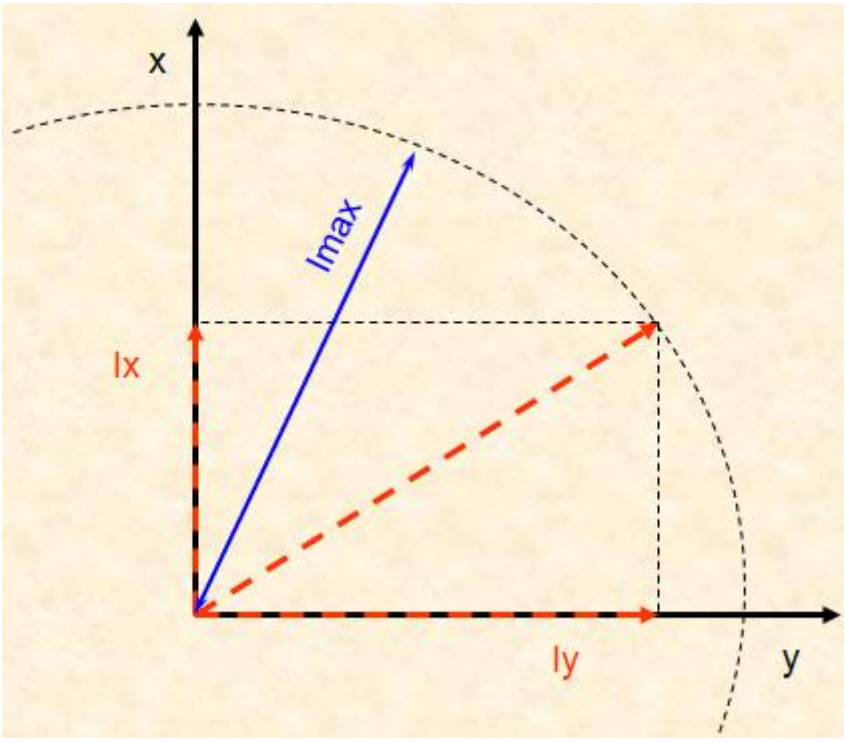

Рисунок 39. Геометрическое разложения вектора максимального тока.

Исходя из рисунка 39, можно записать выражение $I_{\max} \geq \sqrt{I_x^2 + I_y^2}$

I_x - намагничивающая часть составляющей тока статора АД

I_y -эта составляющая пропорциональна моментному усилию, развиваемому на валу АД

$I_{\max} = 3 \cdot I_н = 3 \cdot 10.8 = 32.4 A$

Примем:

$I_x = 1 \cdot I_{\max}$

$I_y = 3 \cdot I_{\max}$

5.3 Создание нелинейной модели со ступенчатым набросом нагрузки.

После того как были произведены расчеты всех ограничений на выходах регуляторов собираем полученную нелинейную модель (рисунок 42).

Чтобы удостовериться в правильности расчетов необходимо получить характеристики переходных процессов по скорости и потокосцеплению. При этом максимальные значения напряжения и тока на выходе не контуров не должны превышать заданные максимальные значения. Характеристика переходного процесса по скорости и потокосцеплению со ступенчатым набросом нагрузки, представлена на рисунке 40.

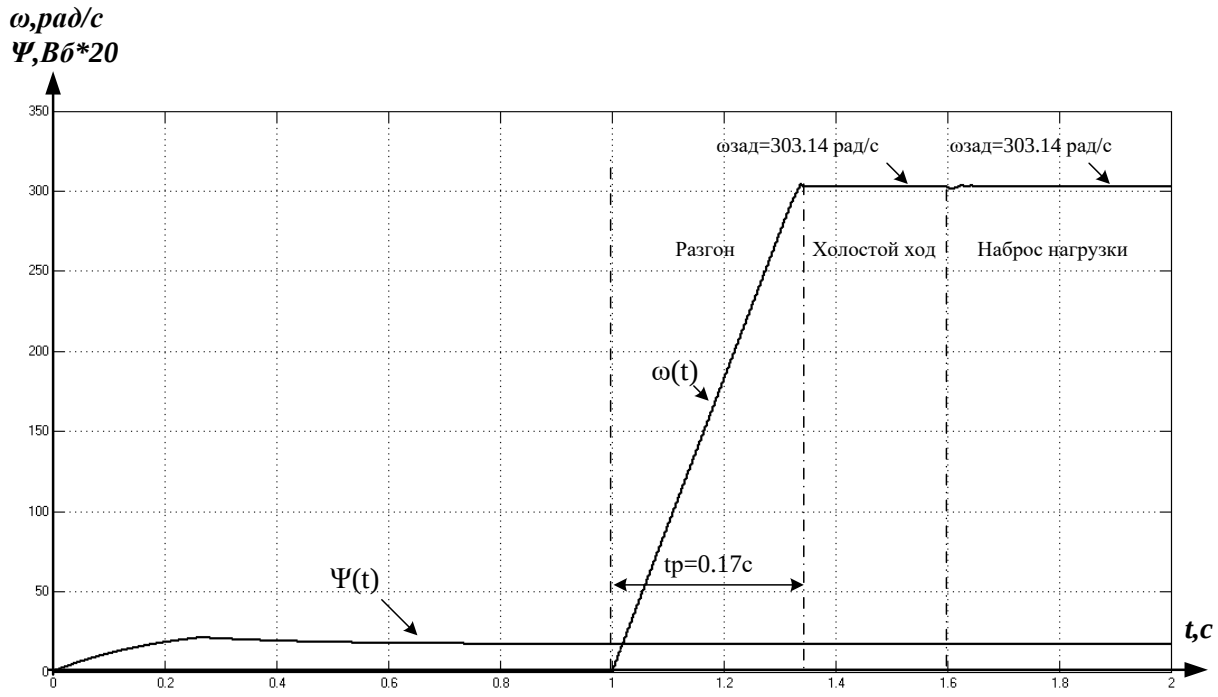

Рисунок 40. Характеристика переходного процесса по скорости и потокосцеплению со ступенчатым набросом нагрузки.

Как видно из рисунка 40 скорость не превышает заданного максимального значения в 303.13 рад/с даже после наброса нагрузки. Система управления хорошо отрабатывает данное задние.

Чтобы до конца удостовериться в правильности полученных результатов необходимо взглянуть на максимальные значения тока и напряжения (рисунок 41).

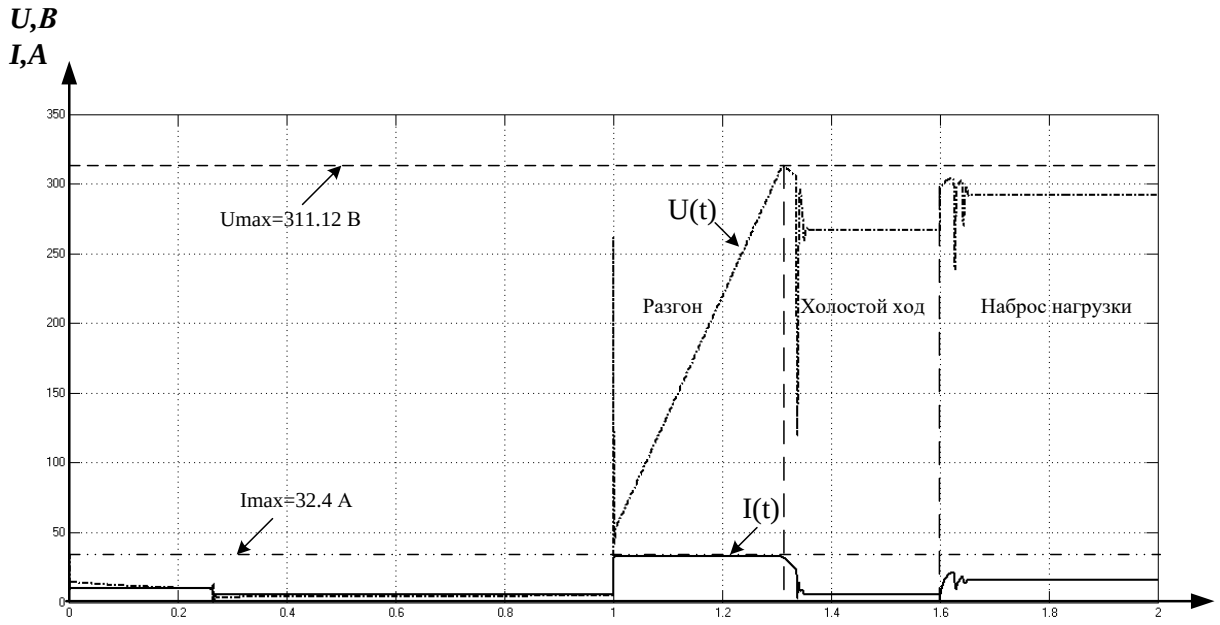

Рисунок 41. Характеристика переходного процесса по напряжению и току со ступенчатым набросом нагрузки.

Как видно из рисунка 41 максимальные значения тока и напряжения не превышают максимальных рассчитанных значений. Это позволяет нам сделать вывод, что система управления работает исправно.

Ступенчатое задание нагрузке не является корректным для технологического процесса описанного в диссертации. Требуется создать такую нагрузку которая будет изменяться нелинейно с увеличением скорости. Такая нагрузка носит название «вентиляторного типа».

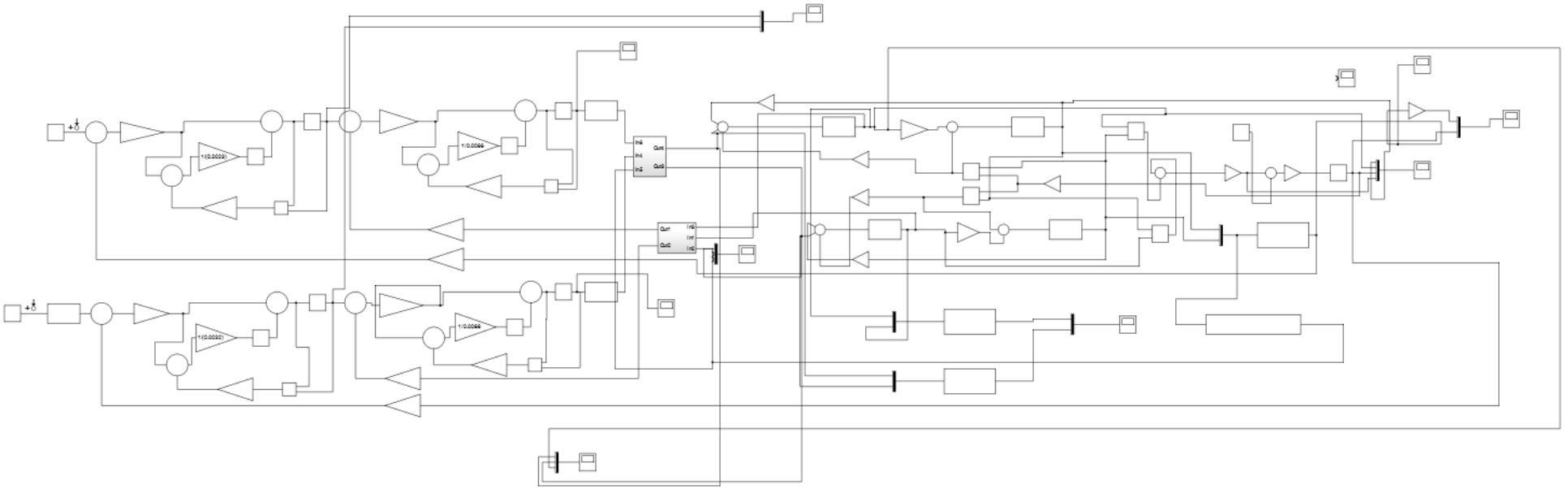

Рисунок 42. Нелинейная модель АД со ступенчатым набросом нагрузки в среде *Matlab Simulink.*

5.4 Создание нелинейной модели с насосной нагрузкой.

Чтобы создать нелинейную нагрузку которая будет изменяться с изменением скорости воспользуемся блоком 1-D Lookup Table в библиотеке Matlab. Внешний вид блока 1-D Lookup Table приведен на рисунке 43.

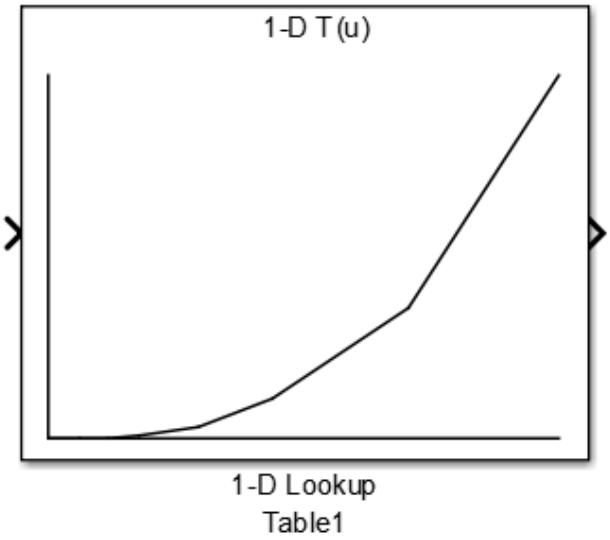

Рисунок 43. Внешний вид блока 1-D Lookup Table.

Рассчитаем нагрузку по формуле: $M_c = 0.1 \cdot M_н + 0.9 \cdot M_н \cdot (\frac{\omega}{\omega_н})^3$

Зададим точки по скорости: $\omega = 0, 20, 40, 60, 100, 150, 240, 340 рад/с$

Получим значения Мс в заданных точках: $M_c = 1.814, 1.818, 1.834, 1.928, 2.34, 3.97, 9.14, 22.54 Н \cdot м$

Значение нагрузочной характеристики приведено в таблице 10.

Таблица 10. Значение нагрузочной характеристики.

$\omega, рад/с$	0	20	40	60	100	150	240	340
$M_c, Н \cdot м$	1.814	1.818	1.834	1.928	2.34	3.97	9.14	22.54

Перенесем полученные значения в блок 1-D Lookup Table.

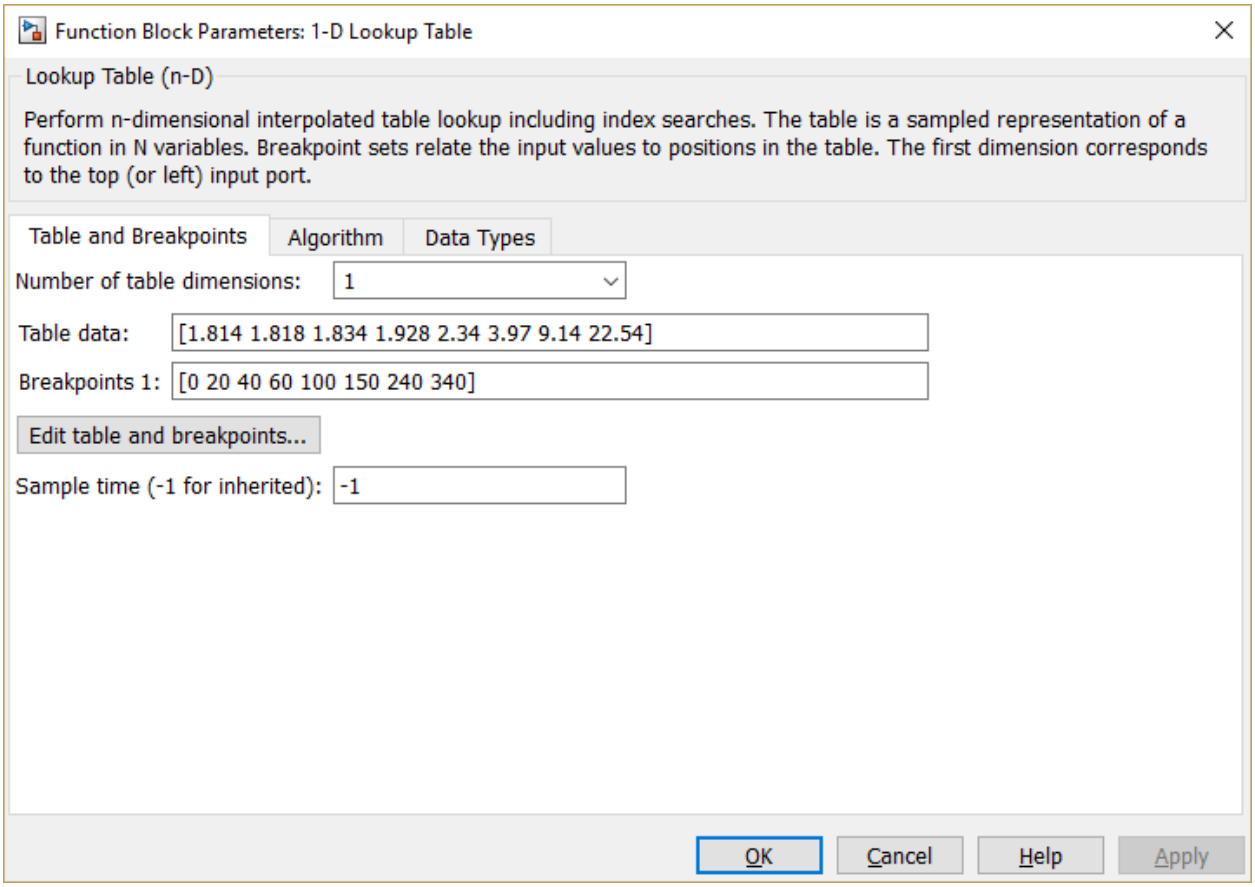

Рисунок 44. Внешний вид окна блока 1-D Lookup Table с рассчитанной нагрузкой.

После расчета и переноса ее в среду Matlab произведем замену нагрузки ступенчатого типа на нелинейную. Внешний вид модели с нелинейной нагрузкой представлен на рисунке 47.

Как говорилось выше в разделе 5.3 проверим правильность расчетов по переходным характеристикам потокосцепления и скорости, напряжения и тока. Данные характеристики приведены на рисунках 45 и 46.

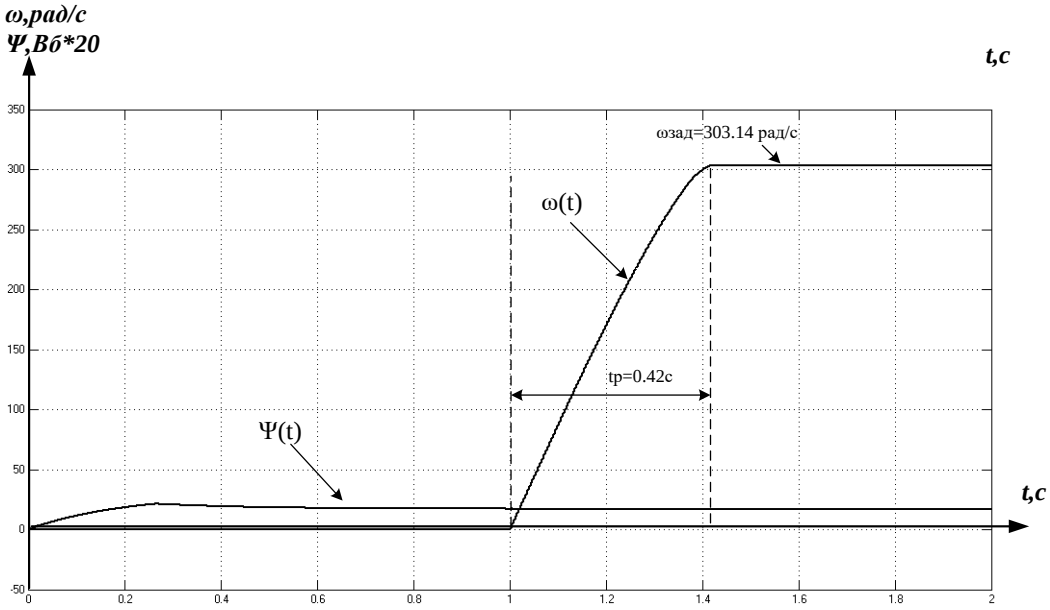

Рисунок 45. Характеристика переходного процесса по скорости и потокосцеплению с нелинейной нагрузкой.

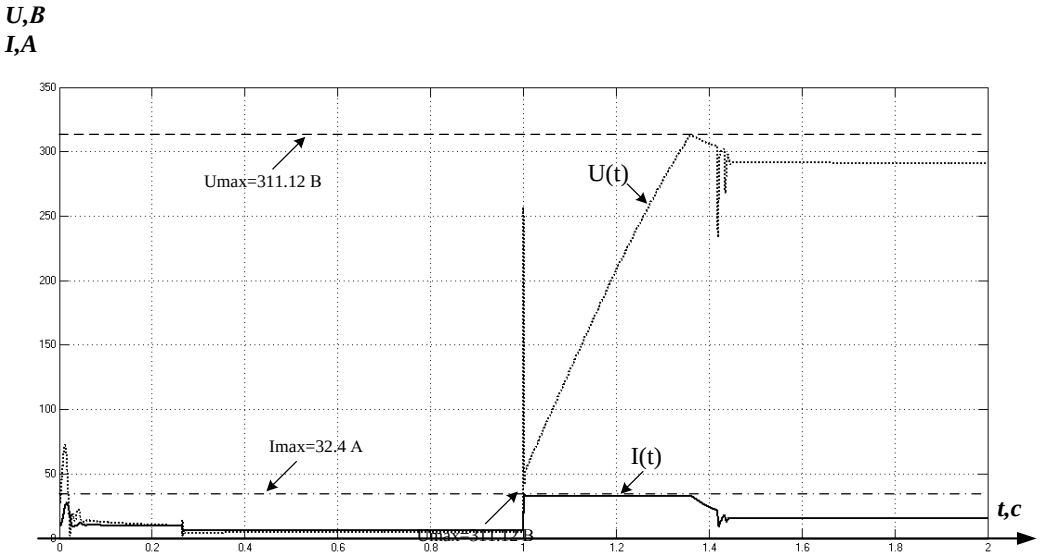

Рисунок 46. Характеристика переходного процесса по напряжению и току с нелинейной нагрузкой.

Исходя из рисунка 45 видно что система управления точно отрабатывает задание по скорости при этом не превышая ограничений по току и напряжению. Из этого можно сделать вывод что система управления для фильтрационного насоса бассейна разработана верно. Для полноты эксперимента произведем проверку работы установки при разных заданиях по скорости.

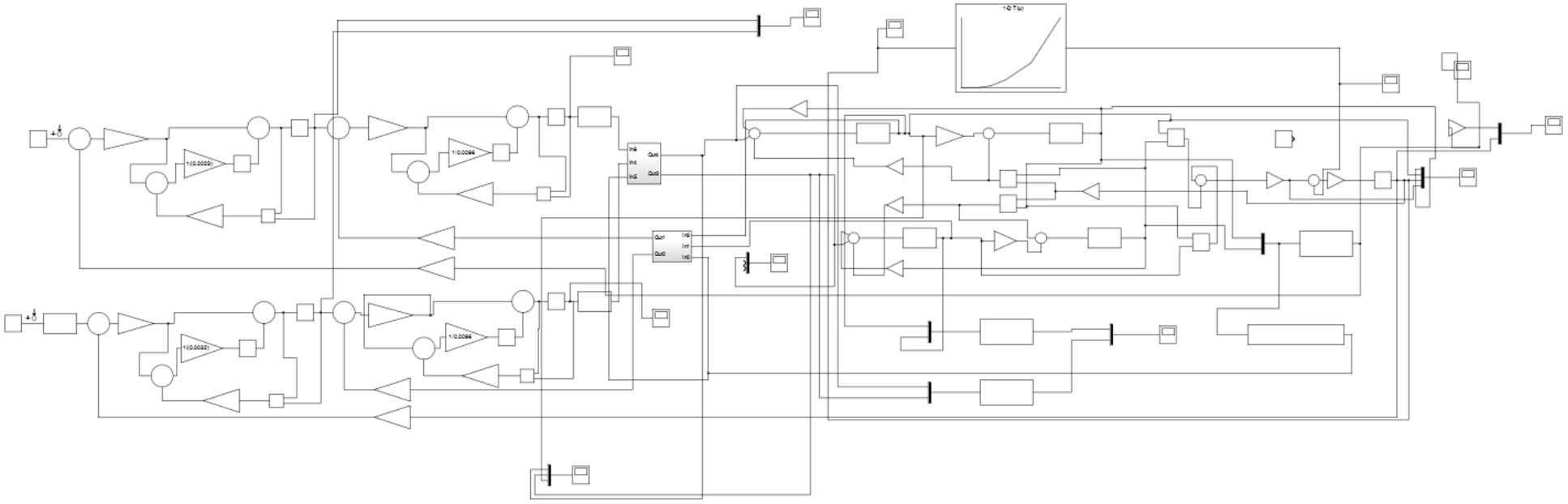

Рисунок 47. Нелинейная модель АД с нелинейной нагрузкой в среде *Matlab Simulink*

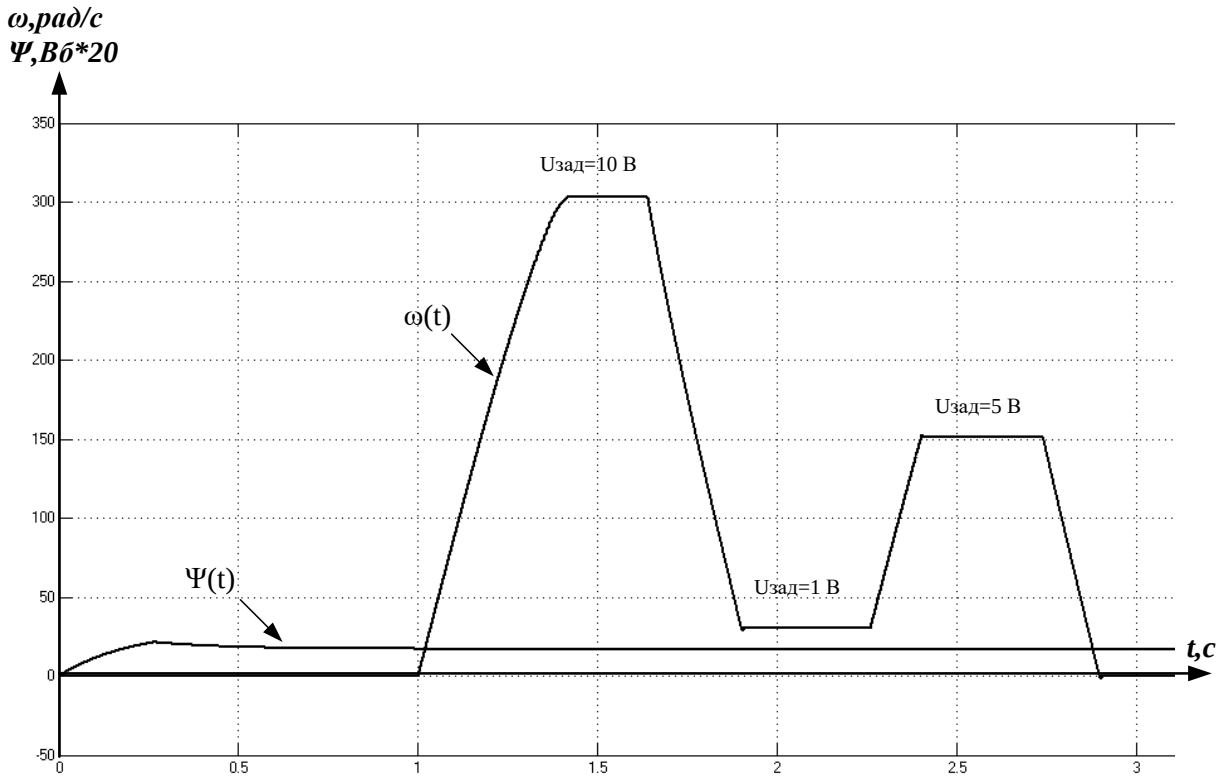

Рисунок 48. Характеристика переходного процесса по скорости и потокосцеплению с нелинейной нагрузкой при разных напряжениях задания.

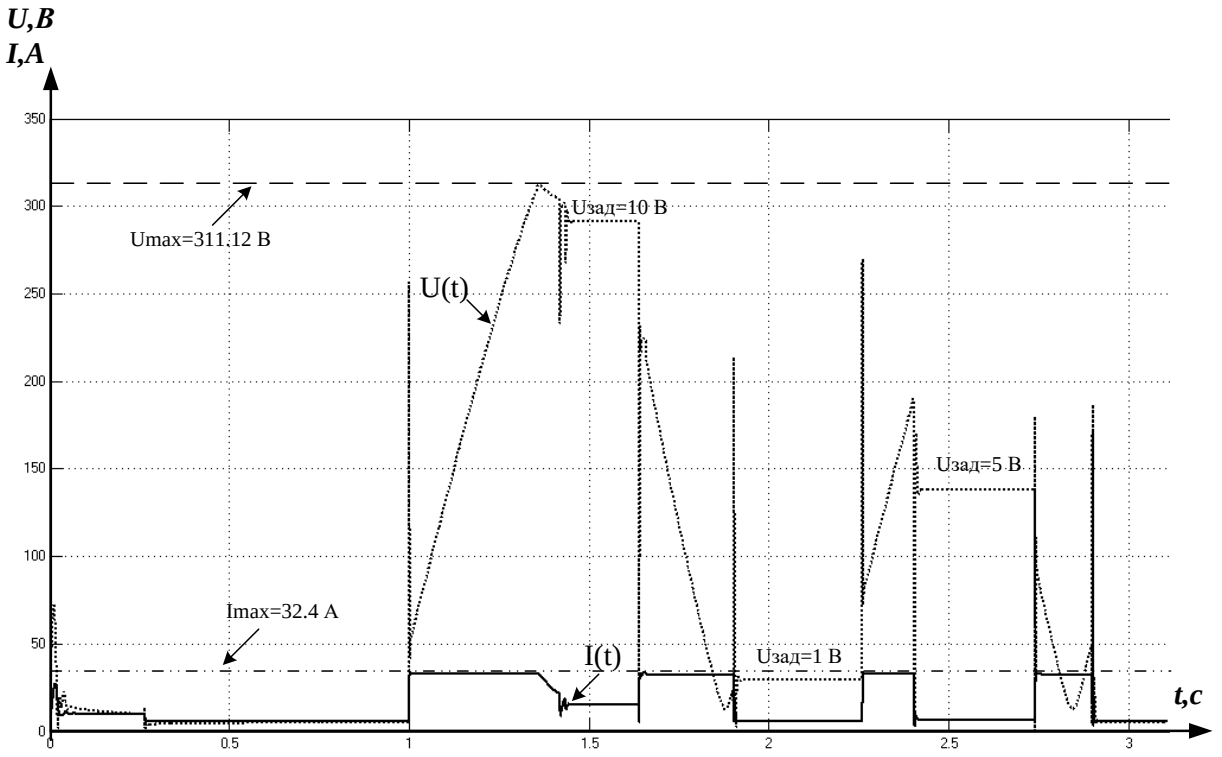

Рисунок 49. Характеристика переходного процесса по напряжению и току с нелинейной нагрузкой при разных значениях напряжения задания по скорости.

Как видно из рисунков 48 и 49 система управления отрабатывает различные значения скорости при различных напряжениях задания при этом не превышая максимальные значения тока и напряжения. Это еще раз подтверждает что система управления разработана верно и может быть использована на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской диссертации была спроектирована система управления для фильтрационного насоса на базе ПЧ.

Применение ПЧ позволило повысить производительность, а также надежность производства, так как в системе используется самая простейшая электрическая машина – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. В настоящее время система ПЧ-АД получает широкое распространение, так как это экономически целесообразнее. Высокая плавность и точность регулирования скорости также являются одними из основных достоинств такой системы.

Для данного производственного механизма была спроектирована индивидуальная система автоматического управления, которая позволила достичь требуемых показателей качества. Данная система векторного управления отличается высокой точностью и управления и плавностью протекания процессов по сравнению со скалярной системой управления. Переходные процессы по скорости протекают очень плавно. Это позволит избежать кавитационных ударов в трубах, тем самым продлив их срок службы. В перспективе для данной системы можно установить датчик момента на валу. Этот датчик будет отслеживать нагрузку на валу с высокой точностью и характеризовать тем самым степень забитости фильтра. Это позволить точно рассчитать ресурс работы фильтра и своевременно провести мероприятия по его замене или очистке. Под систему фильтрации бассейна в соответствии с рассчетами было специально подобрано оборудование: специальный фильтрационный насос предназначенный для фильтрации воды в бассейне «IML Atlas AT 0750», преобразователь частоты «E2-8300-007H». Была смоделирована модель имитирующая пуск двигателя с заданной нагрузкой. Благодаря этой модели были получены переходные процессы по скорости с потокосцеплением и напряжения с током. Данные процессы соответствуют расчетам, что подтверждает правильность выбора вышеперечисленного оборудования и создания системы управления в общем.

Так же были рассмотрены экономические и аспекты проектирования нежного электропривода. Учтены вопросы социальной безопасности труда. Были выявлены опасные и вредные факторы производства. Основываясь на этих факторах были подобраны защитные средства, которые помогают обезопасить обслуживающий персонал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 218 с.
2. Электротехнический справочник: В 4т. Т.4. Использование электрической энергии / Под общей редакцией профессора МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: издательство МЭИ, 2002. – 696 с.
3. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 152 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. –2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.: ил.
5. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 304 с.: ил.
6. Чернышев А.Ю., Кояин Н.В. Проектирование электрических приводов: Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 120 с.
7. М.А. Мельников Внутрицеховое электроснабжение Изд-во ТПУ, 2007.-166с.
8. http://vesper.ru/