

М.Л. Хейфец, д.т.н., проф.

А.М. Пынькин

Д.В. Семенов, к.т.н.

Н.Л. Грецкий, н.с.

ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск

К.А. Антончик, инж.

СОАО «Коммунарка», Минск

## Технологический комплекс послойного синтеза изделий из неметаллических композитов

*Рассмотрен технологический комплекс послойного синтеза изделий, применяемые неметаллические композиты и технологии их приготовления, позволяющие создавать разнообразные строительные конструкции широкого применения в аддитивном производстве. Показана структура и механизмы перемещения. Проведен анализ и выбор автоматизированного привода для горизонтального перемещения. Построена имитационная модель автоматизированного привода в среде MATLAB-SIMULINK с применением блока двигателя из библиотеки SimPowerSystems показывающая, что при реализации систем управления в электроприводах без использования датчика скорости и датчика положения, возникают проблемы, связанные с восстановлением выходных координат, которые можно решить только при использовании контроллеров, способных выполнять требуемые вычисления в режиме реального времени.*

**Ключевые слова:** синтез; неметаллические композиты; имитационная модель; управление электроприводами.

**Введение.** Технологические комплексы послойного синтеза изделий из неметаллических композитов многочисленны и разнообразны, представляют собой средства технического оснащения, которые обеспечивают эффективное и бесперебойное производство изделий, соблюдение условий технологического процесса, выполнение вспомогательных производственных мероприятий.

Особый интерес представляют технологические комплексы послойного синтеза для производства строительных конструкций из неметаллических композитов, отличающиеся с учетом специфики выпускаемых изделий, широким многообразием предложенных и успешно реализуемых схем.

**Материалы.** Среди применяемых неметаллических композитов в аддитивном производстве послойного синтеза строительных конструкций наибольшее распространение получили строительные смеси на основе цемента быстротвердеющих бетонов и строительных растворов. Для получения необходимых технологических свойств, применяемых материалов требуется одновременное использование различных по своему составу и назначению химических добавок, обеспечивающих корректировку прочности, пластичности, жесткости, плотности и других свойств рабочей смеси. Согласно ГОСТ 24211 химические добавки для бетонов и строительных растворов в зависимости от их назначения классифицируют на следующие группы [1]:

- добавки-регуляторы реологических свойств бетонных и растворных смесей, к которым относятся суперпластификаторы, пластифицирующие и стабилизирующие добавки;
- добавки-регуляторы схватывания цементного теста и твердения бетона и строительного раствора, включающие замедлители схватывания и твердения, ускорители схватывания и твердения, противоморозные добавки;
- добавки-регуляторы структуры бетона и раствора, к которым относятся пластифицирующе-воздухововлекающие, воздухововлекающие, пено- и газообразующие, уплотняющие и гидрофобизирующие;
- добавки, улучшающие качество бетона и строительного раствора: полимерные; повышающие водонепроницаемость, морозостойкость, воздухо- и газонепроницаемость бетона и раствора; улучшающие коррозионную стойкость стали, бетона и раствора и придающие им бактерицидные свойства;
- тонкодисперсные минеральные добавки;
- добавки-заменители части цемента в бетонах и растворах;
- минеральные добавки-наполнители в бетонах и растворах;
- минеральные пластифицирующие добавки;
- комплексные добавки различного назначения.

Введение в состав бетона или строительного раствора химических добавок в виде отдельных компонентов или их композиции позволяет повысить показатели материала [2].

Для обеспечения соответствия строительных растворов требованиям аддитивного процесса формирования они должны характеризоваться высокой скоростью схватывания и твердения цементного теста, повышенной подвижностью и низким водопотреблением.

Как правило, химические добавки для бетона и строительных растворов приготавливаются с водой затворения [2–3]. При этом под оптимальной дозировкой добавки понимается ее минимальное количество, при котором достигается максимальный эффект от ее использования, оцениваемый по критериям эффективности согласно ГОСТ 24211. Например, критерий эффективности для ускорителей схватывания и твердения определяет прирост прочности не менее чем на 20 % через сутки нормального твердения.

Действие ускорителей схватывания и твердения бетонов и строительных растворов заключается, главным образом, в уменьшении электрических зарядов частиц цемента, что позволяет активизировать процесс гидратации трехкальциевого алюмината в нем и уплотнить структуру цементного камня в ранние сроки ее формирования [3].

Оптимальный расход ускорителей схватывания и твердения бетонов при приготовлении бетонов и строительных растворов составляет 1÷3 % от массы сухого цемента и зависит от химического состава последнего, свойств наполнителей, требований к готовым изделиям, наличия в них арматуры и др.

**Структура технологического комплекса.** Современный технологический комплекс послойного синтеза изделий из неметаллических композитов должен отличаться высокой степенью автоматизации. Поэтому, высокие требования к надежности технологического оборудования обусловлены тем, что в большинстве случаев отказы в работе приводят к нарушению технологического процесса, браку и простою производства. Для поддержания качества и увеличения количества производимой продукции, требуется разработка технологии и оборудования, позволяющего решать широкий диапазон производственных задач.

В ОАО «НПО Центр» предложен порталный технологический комплекс послойного синтеза изделий из неметаллических композитов (рисунку 1).

Портальный технологический комплекс состоит (рисунку 1) из порталной рамы 1, механизмов перемещения 2, 3 и дозатора, который представляет собой конструкцию, состоящую из емкости 4 для приготовленного композитного состава (смеси), подающего устройства 5 и рабочего органа 6.

Объем смеси в емкости контролируется датчиками и пополняется по трубе из резервуара насосом. При опускании уровня смеси ниже допустимого открывается клапан и включается насос подачи, после достижения верхнего уровня насос отключается и закрывается клапан. Внутри емкости расположена лопастная мешалка необходимая для поддержания однородности смеси, поскольку однородность массы является крайне важным обстоятельством для точной дозировки и качества получаемого изделия.

Рабочий орган представляет собой сопло для подачи композитного материала с клапаном. Клапан рабочего органа открывается, когда привод горизонтального перемещения совершает движение по рабочей траектории, при ее окончании клапан закрывается и выдавливание массы прекращается, а горизонтальный привод продолжает движение до следующей заданной траектории. Таким образом, оборудованию ставится задача точного дозирования массы, а также точного позиционирования на заданной траектории.

**Механизмы перемещения и автоматизированный привод применяемые в технологическом комплексе послойного синтеза изделий.** В качестве механизмов перемещения применяются приводы горизонтального и вертикального движения рабочего органа. Привод механизмов перемещения выполнен в виде зубчатой рейки, таким образом проскальзывание сведено к минимуму.

Привод вертикального движения осуществляет позиционирование рабочего органа относительно рабочей точки, т.е. там, где осуществляется начало подачи смеси, и подъем к исходному положению по завершению печати слоя. Положение вертикальной составляющей рабочего органа постоянно в течении печати каждого слоя и контролируется датчиком положения двигателя. В связи с широким ассортиментом используемых композитных материалов толщина печатаемого слоя различна, а следовательно, положение рабочей точки разное, что учитывается при подготовке управляющей программы печати.

Привод горизонтального движения позиционирует рабочий орган в горизонтальной плоскости по заданной траектории печатаемого слоя, при этом открывается и закрывается клапан подачи смеси на заданных участках траектории, а привод подающего устройства осуществляет требуемое дозирование смеси. Движение данного привода контролируется датчиком положения и согласуется с управляющей программой.

Рассмотрим электропривод осуществляющий требуемое позиционирование в горизонтальной плоскости рабочего органа подачи смеси и построим имитационную модель электропривода.

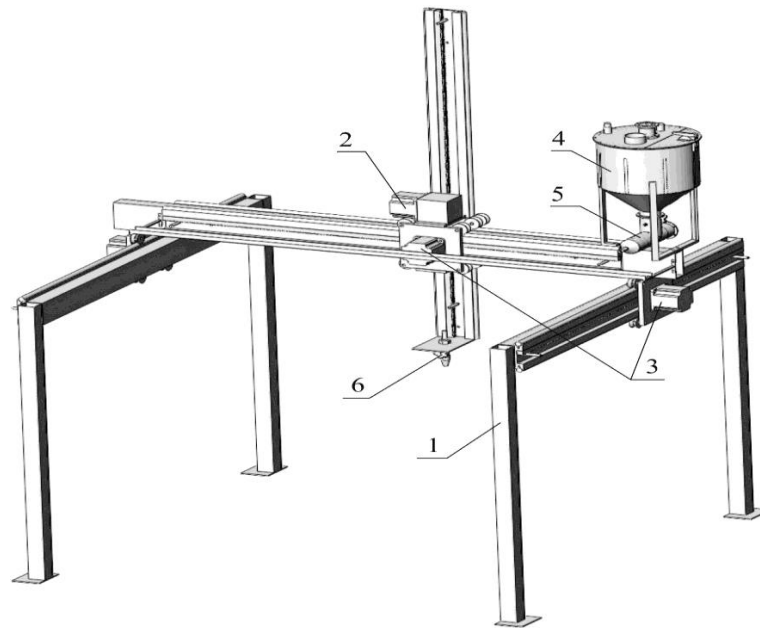


Рис. 1. Портальный технологический комплекс послойного синтеза изделий из неметаллических композитов: 1 – портальная рама; 2,3 – механизмы перемещения; 4 – дозатор; 5 – подающее устройство; 6 – рабочий орган

Основными требованиями, предъявляемыми композиционным электроприводам, являются: точность позиционирования, определяемая обычно как полоса расстояний по обе стороны от заданной позиции, в которой должен быть остановлен исполнительный орган; стабильность, оцениваемая как повторяемость результатов точности при многократной отработке одного и того же заданного перемещения; производительность, определяемая временем отработки заданного перемещения и временем позиционирования; экономичность, определяемая минимумом капитальных и эксплуатационных затрат.

Стабильность позиционирования определяется вероятностным характером процессов, имеющих место в электроприводе, датчиках и системе управления. Она дает представление об их свойствах при эксплуатации позиционного электропривода с точки зрения точности работы системы по отработке одного и того же перемещения. Это связано с тем, что позиционный электропривод находится под воздействием возмущений, являющихся случайными функциями. Основными возмущениями являются случайные изменения статического момента нагрузки электропривода и вносимые им случайные изменения параметров кинематических цепей, передающих устройств электропривода и связей датчиков с исполнительным органом или электроприводом. Сюда же относятся случайные изменения моментов инерции, зависящие от загрузки механизма и перемещаемых масс рабочей машины. Рассматриваемое оборудование выдавливает композиционный материал на траектории движения, таким образом, дополним список требований к приводам тем, что необходимо выдавливать определенную порцию вязкой массы, а также не допускать выхода ошибки позиционирования за установленные пределы [4–7].

Проведем сравнительный анализ и выясним, какой тип двигателя наиболее удовлетворяет предъявляемым требованиям. Наиболее полно удовлетворяют заявленным требованиям синхронный, асинхронный и шаговый двигатель. Рассмотрим и проанализируем возможность применения данных приводов для решения поставленных задач.

В синхронных машинах с постоянными магнитами вместо обмотки возбуждения применяют блок постоянных магнитов, изготавливаемый из магнитотвердого материала – кобальтовой стали, а также различных сплавов из алюминия, никеля, железа и кобальта, обладающих большой коэрцитивной силой. Электромагнитные процессы, происходящие в синхронных машинах с постоянными магнитами, в основном аналогичны электромагнитным процессам, происходящим в машинах с электромагнитным возбуждением. Однако на магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами, сильное воздействие оказывает магнитодвижущая сила (МДС) якоря. Значительному размагничивающему действию со стороны якоря постоянные магниты подвергаются во время пуска синхронного двигателя, когда ток якоря наибольший. Двигатели с постоянными магнитами по сравнению с другими типами синхронных двигателей обладают хорошими энергетическими показателями (КПД и  $\cos \varphi$ ), повышенной устойчивостью работы в синхронном режиме и высокой стабильностью частоты вращения, а также преимуществом использования такого двигателя является плавная и точная установка положения ротора и скорости вращения двигателя, большой диапазон регулирования. Недостатком их является сравнительно большая стоимость, обусловленная дороговизной материала, из которого изготавливают

постоянные магниты, и большая кратность пускового тока, что имеет значение при работе таких двигателей от полупроводниковых преобразователей, риск размагничивания при высоких значениях тока и температуры, что, однако, редко встречается на практике; а также проблемы, связанные с ремонтом двигателя, необходимость сложной системы управления, включающая преобразователь частоты, датчик положения ротора и мощный микроконтроллер системы управления.

Современные трехфазные асинхронные двигатели являются наиболее распространенными преобразователями электрической энергии в механическую. Благодаря своей простоте, низкой стоимости и высокой надёжности асинхронные двигатели получили широкое применение. Они присутствуют повсюду, это самый распространённый тип двигателей, их выпускается около 90 % от общего числа двигателей в мире. Огромная популярность асинхронных двигателей связана с простотой их эксплуатации, дешевизной и надёжностью. Асинхронный электродвигатель, в общем случае обладает высокими техническими показателями, такие как соотношение габаритов и мощности электродвигателя, большой кратностью пускового момента, способности разгоняться и поддерживать управляемость на частотах выше номинальной.

Сравнивая два выше обозначенных типа двигателей, отметим высокий КПД обоих, но, как правило, синхронная машина обладает КПД несколько выше. Также синхронный двигатель обладает большей перегрузочной способностью и другими электромеханическими характеристиками. Касаясь, технологических требований к установке отметим также, что система с синхронным электродвигателем обладает меньшей ошибкой позиционирования. Таким образом, синхронный двигатель наиболее подходит для удовлетворения требований, предъявляемых к приводу движения в горизонтальной плоскости. Возможное применение асинхронного двигателя в совокупности с преобразователем частоты может не удовлетворить предъявляемым требованиям, и в общем случае необходимо завышать мощность двигателя для создания нужного пускового момента. К тому же асинхронный двигатель такой же мощности обладает худшими характеристиками, чем синхронный. Одним из основных критериев для выбора двигателя является пусковой момент, чтобы рабочий орган разогнался на ограниченном участке до рабочей скорости. Важным является способность системы поддерживать постоянную скорость двигателя на интервалах выдавливания композиционных материалов на протяжении всей траектории движения рабочего органа машины.

Шаговые двигатели также широко применяются высокоточных системах. Шаговым двигателем называют электромеханическое устройство, преобразующее электрические сигналы в дискретные угловые перемещения вала. Применение шаговых двигателей позволяет рабочим органам машин совершать строго дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце движения. Это объясняется тем, что указанные двигатели позволяют преобразовать управляющий импульс в фиксированный угол поворота вала или фиксированное линейное перемещение без датчика обратной связи. Последнее обстоятельство существенно упрощает систему управления механизмом и увеличивает ее надёжность, так как сокращается количество электронных элементов.

Шаговые двигатели являются приводами исполнительными механизмами, обеспечивающими фиксированные угловые перемещения (шаги). Каждое изменение угла поворота ротора - это реакция шагового двигателя на входной импульс.

Дискретный электропривод с шаговым двигателем естественным образом сочетается с цифровыми управляющими устройствами, что позволяет успешно использовать его в станках с числовым программным управлением, в промышленных роботах и манипуляторах, в часовых механизмах.

Принцип действия шаговых двигателей всех типов состоит в следующем. С помощью электронного коммутатора вырабатываются импульсы напряжения, которые подаются на обмотки управления, расположенные на статоре шагового двигателя.

В зависимости от последовательности возбуждения обмоток управления происходит то или иное дискретное изменение магнитного поля в рабочем зазоре двигателя. При угловом перемещении оси магнитного поля обмоток управления шагового двигателя его ротор дискретно поворачивается вслед за магнитным полем. Закон поворота ротора определяется последовательностью, скважностью и частотой управляющих импульсов, а также типом и конструктивными параметрами шагового двигателя.

Точность позиционирования шагового двигателя, при хорошей механике не ниже  $\pm 0.01$  мм, у высококачественных не ниже  $\pm 0.002$  мкм. Такая точность достижима в случае использования сервоприводов контурного управления, обрабатывающих заданную траекторию. В станках с ЧПУ возможно достижение скоростей, превышающих скорость шагового двигателя. При увеличении скорости шаговые двигатели сильно теряют в крутящем моменте. На скоростях выше номинальных и повышенных нагрузках начинает проявляться эффект потери шагов. Потеря шагов возможна также в случае каких-либо внешних воздействий: ударов, вибраций, резонансов и т.п. Современные системы управления шаговыми двигателями позволяют избавиться от этого общего недостатка шаговых двигателей применения обратной связи. В двигателе имеется датчик положения, по которому в случае несоответствия делается коррекция – то эффекта потери шагов в ней нет. В случае принудительной

остановки шагового двигателя, преобразователь частоты мотора должен правильно среагировать на данную остановку. В противном случае по обратной связи подается сигнал на доработку не пройденного расстояния, повышается ток на обмотках, двигатель может перегреться и сгореть. Принудительная остановка шагового двигателя не вызывает у него никаких повреждений. Шаговые двигатели – бесщеточные, поэтому единственными изнашиваемыми деталями в конструкции являются подшипники. Это позволяет считать их двигателями высокой надежности и не требующих обслуживания долгий срок. Ограничением в использовании шаговых двигателей являются мощность и соответственно скорость.

Исходя из сравнительного анализа, типов применяемых электродвигателей сделаем вывод, что каждый тип двигателей занимает собственную нишу. Асинхронный электродвигатель применяется для общепромышленных задач, как тяговый, силовой привод, шаговый двигатель используется в основном в маломощных системах, такие как топливоподача, приборах времени и т.д.. Наиболее удовлетворяет требованиям технологического комплекса послойного синтеза изделий из неметаллических композитов синхронный электродвигатель, который наряду высокими электрическими и электромеханическими показателями обладает лучшей из перечисленных типов двигателей управляемостью и точностью позиционирования.

В качестве управляющего устройства целесообразно выбрать преобразователь частоты. При использовании частотного преобразователя пуск двигателя происходит плавно, без пусковых токов и ударов, что уменьшает нагрузку на двигатель и механику, увеличивает срок их службы. Применение частотного преобразователя с обратной связью обеспечивает точное поддержание требуемой координаты электропривода, при переменной нагрузке, что во многих случаях позволяет значительно улучшить качество технологического процесса. Для питающей сети преобразователь является чисто активной нагрузкой и потребляет ровно столько энергии, сколько требуется для выполнения механической работы (с учётом КПД преобразователя и двигателя) [4, 7].

Применение регулируемого частотного электропривода позволяет сберечь энергию путём устранения непроизводительных затрат энергии в механических муфтах и других регулирующих устройствах. При этом экономия прямо пропорциональна непроизводительным затратам и может достигать 80 %.

Частотный преобразователь позволяет регулировать выходную частоту в пределах от 0 до 400 Гц. Разгон и торможение двигателя осуществляется плавно, время разгона и торможения можно настраивать в пределах от 0.1 сек до 30 мин. При разгоне происходит автоматическое увеличение момента для компенсации инерционной нагрузки.

Частотные преобразователи обеспечивают полную электронную защиту преобразователя и двигателя от перегрузок по току, перегрева, утечки на землю и обрыва линий передачи. Преобразователь позволяет отслеживать и отображать на цифровом пульте основные параметры системы – заданную скорость, выходную частоту, ток и напряжение двигателя, выходную мощность и момент, состояние дискретных входов, общее время работы преобразователя и т. д. В зависимости от характера нагрузки можно выбрать вольт-частотную характеристику или создать свою собственную [8].

Современные преобразователи частоты поддерживают вольт-частотное скалярное управление и векторное управление. Системы скалярного управления применяются в электроприводах с невысокими требованиями к динамическим показателям и диапазонам регулирования скорости. Системы векторного управления применяются в более сложных и ответственных электроприводах с высокими требованиями к динамике и диапазону регулирования скорости.

Применение системы преобразователь частоты – электродвигатель с датчиком обратной связи по положению позволит качественно обрабатывать перемещения рабочего органа с допустимыми погрешностями.

Таким образом, на основании выше сказанного, в данном технологическом комплексе применен электропривод горизонтального движения с синхронным двигателем с датчиком положения, управляемый преобразователем частоты.

**Имитационная модель электропривода.** Осуществим построение имитационной модели электропривода с применением блока двигателя из библиотеки SimPowerSystems. Для реализации управления системой применим регуляторы, как и в системе управления в осях d-q. Для моделирования сигналы в осях d-q необходимо преобразовать. После выполнения преобразования Кларка и Парка возможно моделирование системы. С выхода преобразователя частоты подается реальное значение напряжения (которое можно измерить прибором) на статор двигателя. Регулирование скорости осуществляется изменением частоты, питающего двигатель, напряжения [6].

Для обеспечения более четких законов управления в симметричных трехфазных цепях применение d-q – преобразования уменьшает количество координат с трех переменного тока до двух – постоянного тока. Это позволяет проводить упрощенные расчеты с последующим обратным преобразованием для восстановления фактических трехфазных координат переменного тока. Такое преобразование используется для того, чтобы упростить анализ трехфазных синхронных машин, а так же для контроля

трехфазных инверторов. Мгновенные значения фазовых токов в статоре  $i_a$ ,  $i_b$  и  $i_c$ , снимаемые в инверторе с помощью датчиков тока, можно рассматривать как три планарные системы координат. Конечно, в планарной системе есть только две степени свободы и возможны только два независимых вектора. Любая дополнительная величина может быть выражена как их линейная комбинация.

d-q – преобразование концептуально похоже на  $\alpha$ - $\beta$  – преобразование. В тоже время d-q – преобразование является проекцией фазовых величин на вращающиеся две оси отсчета,  $\alpha$ - $\beta$  – преобразование можно рассматривать как проекцию фазовых величин, на стационарную систему координат, состоящую из двух осей.  $\alpha$ - $\beta$  – преобразование сравнимо с d-q трансформацией. Одно из самых полезных приложений альфа-бета трансформации – это генерация опорного сигнала, используемого в векторно-пространственном модуляционном контроле, в трехфазных инверторах.

На общем виде модели (рисунку 2) представлена система управления электроприводом горизонтального движения.

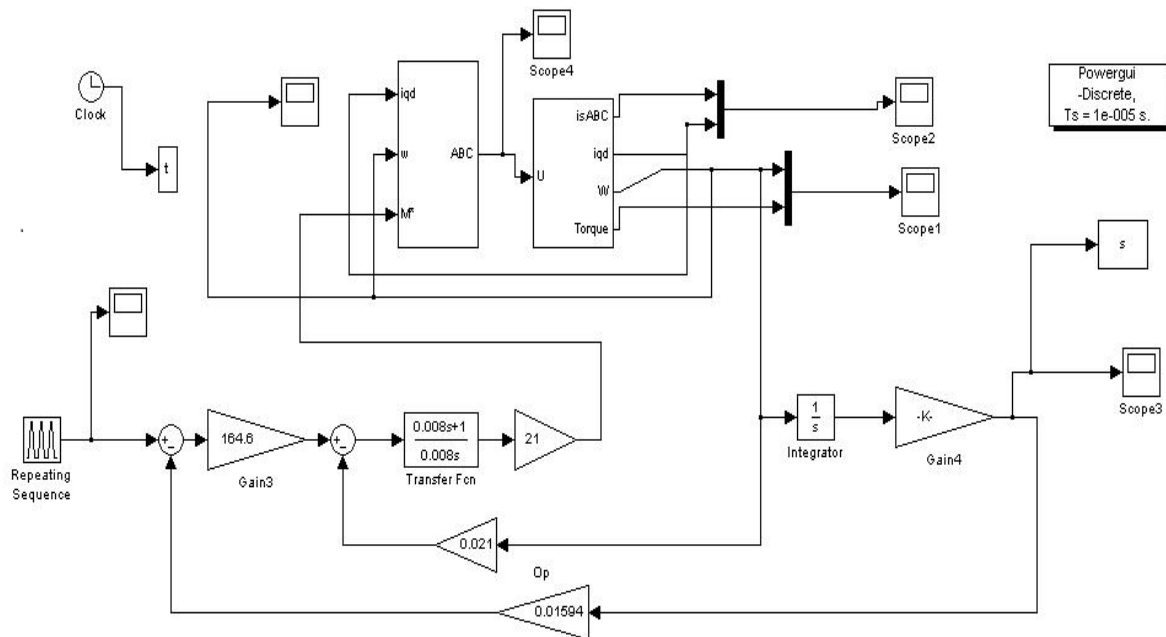


Рис. 2. Имитационная модель электропривода горизонтального движения

Сигнал задающего воздействия представлен блоком повторяющейся последовательности. С выхода электродвигателя имеем необходимые сигналы в качестве обратных связей, такие как скорость, токи, напряжения и другие. Интегрируя скорость получим значение перемещения, которое используем для регулирования положения. Блоки регуляторов и силовой части осуществляют регулирование и преобразование величин для работы электродвигателя.

На рисунке 3 раскрыт блок с регуляторами тока и преобразованиями Кларка и Парка. Входными величинами для блока являются сигнал задания тока, обратная связь по скорости двигателя и обратная связь по току двигателя в осях d-q. Блок ограничения предназначен для ограничения сигнала задания тока таким образом, чтобы его значение не превышало максимально возможную для данного двигателя.

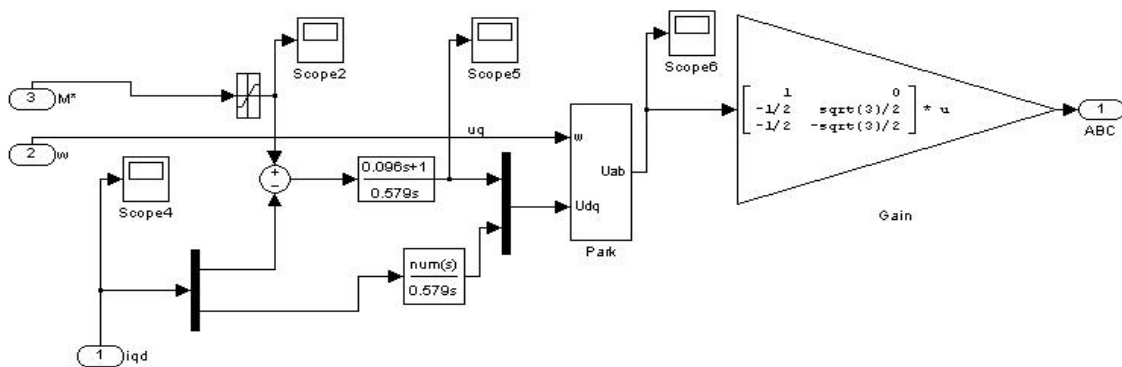


Рис. 3. Блок регуляторов и преобразований

Входными величинами блока преобразований Парка (рис. 4) являются сигнал скорости электродвигателя и напряжение в осях d-q, выходной величиной является напряжение в осях  $\alpha$ - $\beta$ .

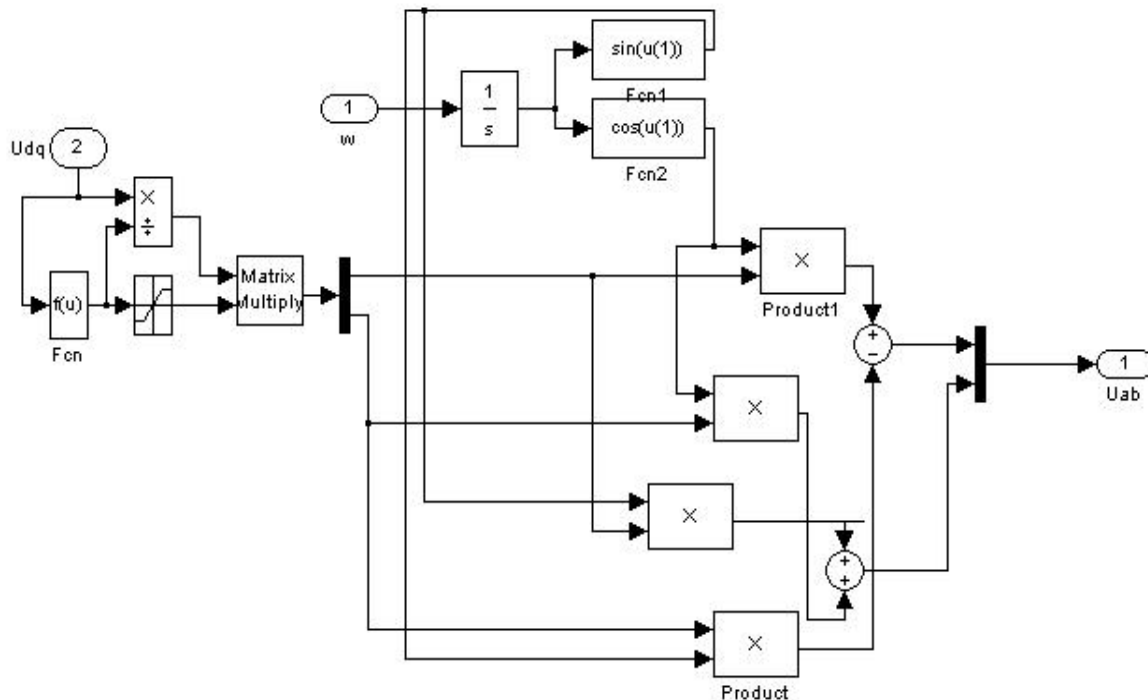


Рис. 4. Преобразования Парка

Силовая часть модели реализована следующим образом (рисунку 5). Преобразователь частоты подает напряжение определенной частоты на статор электродвигателя, регулируя тем самым скорость вращения вала двигателя. В рассматриваемой нами системе электропривода присутствуют силы трения в различных частях механизма, однако это не является основным возмущающим воздействием. В данной модели, сопротивление реализовано блоком ступенчатого воздействия.

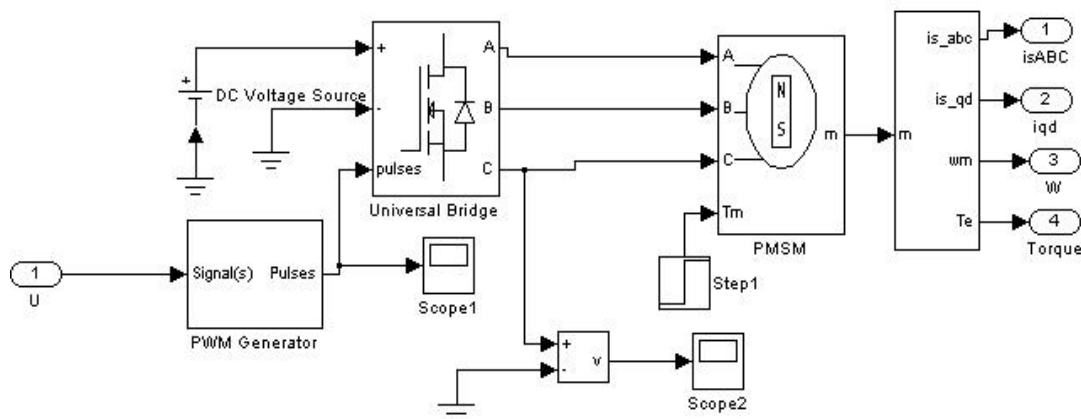


Рис. 5. Силовая часть модели

Современный электропривод это программно-аппаратный комплекс, в котором необходимо решить вопрос о максимальном использовании программной части, а так же об уменьшении числа аппаратных датчиков. Это приводит к неполной обратной связи и требует восстановления выходных координат по показаниям датчика тока и датчика напряжения, расположенных в инверторе. Если в электроприводе нет датчика скорости и датчика положения, то исполнительным устройством в электроприводе выступает синхронный двигатель с постоянными магнитами. Эти двигатели широко распространены в промышленных приводах из-за их высокой удельной мощности, высокого отношению крутящего момента к моменту инерции, малой величины пульсации момента, возможности регулирования на малых скоростях, а так же возможности регулирования момента при нулевой скорости, высокому КПД и малому размеру.

Цикл работы состоит из ожидания сигнала начала работы, движение в положительном направлении, остановки и движения в обратном направлении.

На рисунке 6 показана графическая диаграмма задающего воздействия для привода перемещения рабочего органа в горизонтальной плоскости. На рисунке показан цикл работы, при котором заливочное устройство будет обрабатывать постоянное перемещение, таким образом заливая слой за слоем вязкой массы.

На рисунках 7 и 8 показаны графические диаграммы скорости заливочного устройства на интервале одного цикла. На рисунке 9 показано изменение скорости на участке ускорения с целью оценки времени разгона привода до номинальной скорости.

Таким образом, графическая диаграмма (рисунок 9) показывает разницу между задающим воздействием, т. е. между желаемым перемещением и реальным перемещением рабочего органа. Желаемое перемещение получено умножением задающего воздействия на коэффициент масштабирования. Ошибка позиционирования меньше одного миллиметра, что не является существенным, и составляет менее 1 % от полного перемещения рабочего органа.

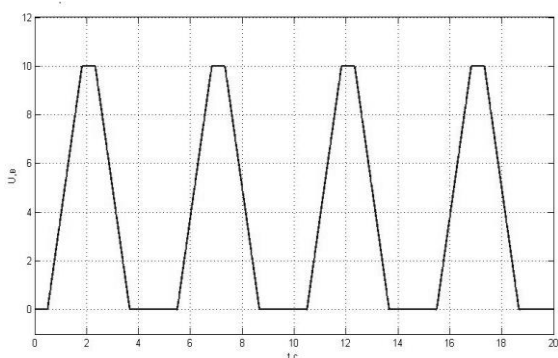


Рис. 6. Графическая диаграмма цикла задающего воздействия

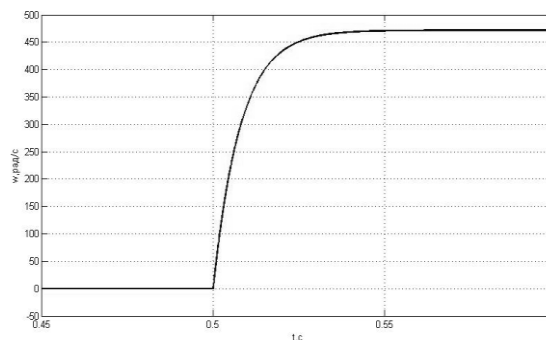


Рис. 7. Графическая диаграмма скорости рабочего органа на участке ускорения

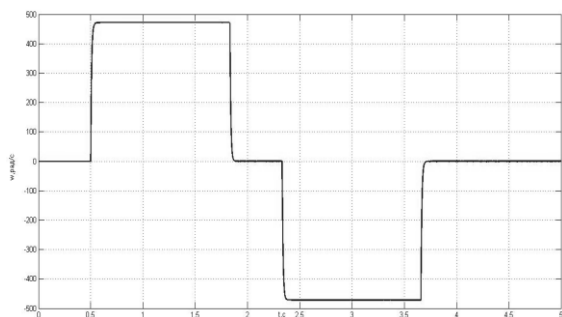


Рис. 8. Графическая диаграмма скорости на участке одного цикла

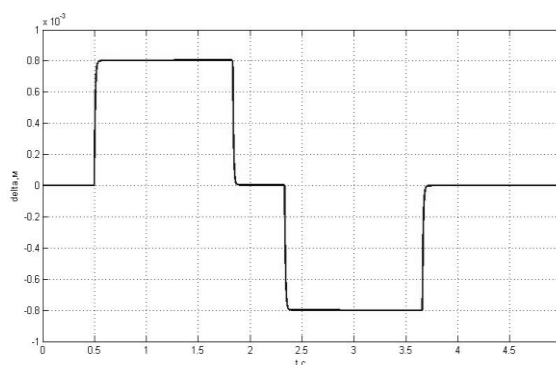


Рис. 9. Графическая диаграмма ошибки позиционирования рабочего органа

**Заключение.** Смоделированные при помощи Matlab Simulink графические диаграммы свидетельствуют о высоком качестве переходных процессов, что в свою очередь означает правильный расчет параметров электропривода и коэффициентов регуляторов. Двигатель разгоняется до заданной скорости без перерегулирования за короткий промежуток времени в сравнении с общим временем цикла и основную часть пути проходит на постоянной скорости, что положительно влияет на качество заливки вязкой массы по траектории движения. Ошибка позиционирования будет присутствовать всегда из-за множества факторов, такие как внешние воздействия, инерционность системы управления, неточности показаний обратной связи положения и других регулируемых координат. Однако следует стремиться и это одна из главных задач позиционного электропривода, уменьшать ошибку позиционирования. Таким образом усовершенствование системы управления связанные с введением дополнительных компенсаций позволит уменьшать ошибку позиционирования. Смоделированная система с синхронным двигателем удовлетворяет требованиям которые мы предъявили к системе.



**Список использованной литературы:**

1. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия : ГОСТ 24211.
2. *Изотов В.С.* Химические добавки для модификации бетона / *В.С. Изотов, Ю.А. Соколова.* – М. : Палеотип, 2006. – 244 с.
3. *Афанасьев Н.Ф.* Добавки в бетоны и растворы / *Н.Ф. Афанасьев, М.К. Целуйко.* – К. : Будивельник, 1989. – 128 с.
4. *Фираго Б.И.* Теория электропривода : учеб. пособие / *Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик.* – 2-е изд. – Мн. : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
5. *Фираго Б.И.* Регулируемые электроприводы переменного тока / *Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик.* – Мн. : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
6. *Лазарев Ю.Ф.* Начала программирования в среде MATLAB : учеб. пособие / *Лазарев Ю.Ф.* – К. : НТУУ «КПИ», 2003. – 424 с.
7. Системы автоматизированного управления электроприводами : учеб. пособие / *Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко, Е.П. Раткевич, О.Л. Симоненкова* ; под общ. ред. *Ю.Н. Петренко.* – Мн. : Новое знание, 2004. – 284 с.
8. *Максимов М.В.* Радиоэлектронные следящие системы / *М.В. Максимов, В.И. Меркулов* // Радиотехника и электроника. Серия : Радио и связь. – 1990. – 256 с.

**References:**

1. Budstandart, *GOST 24211: Dobavki dlja betonov i stroitel'nyh rastvorov* [Additives for concrete and mortars. General specifications], *Obshhie tehicheskie uslovija*.
2. Izotov, V.S. and Sokolova, Ju.A. (2006), *Himicheskie dobavki dlja modifikacii betona*, Paleotip, Moskva, 244 p.
3. Afanas'ev, N.F. and Celujko, M.K. (1989), *Dobavki v betony i rastvory*, Budivjel'nyk, Kiev, 128 p.
4. Firago, B.I. and Pavljachik, L.B. (2007), *Teorija jelektroprivoda*, ucheb. posobie, 2<sup>nd</sup> ed., Tehnoperspektiva, Minsk, 585 p.
5. Firago, B.I. and Pavljachik, L.B. (2006), *Reguliruemye jelektroprivody peremennogo toka*, Tehnoperspektiva, Minsk, 363 p.
6. Lazarev, Ju.F. (2003), *Nachala programmirovaniya v srede MATLAB*, ucheb. posobie, NTUU «KPI», Kiev, 424 p.
7. Gul'kov, G.I., Petrenko, Ju.N., Ratkevich, E.P. and Simonenkova, O.L. (2004), *Sistemy avtomatizirovannogo upravleniya jelektroprivodami*, ucheb. posobie, in Petrenko, Ju.N. (ed.), *Novoe znanie*, Minsk, 284 p.
8. Maksimov, M.V. and Merkulov, V.I. (1990), «*Radiojelektronnye sledjashhie sistemy*», *Redakcija literatury po radiotehnike i jelektronike, Serija Radio i svjaz'*, 256 p.

**Хейфец Михаил Львович** – доктор технических наук, профессор, заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук НАН Беларуси, Национальная академия наук Беларуси.

Научные интересы:

- материаловедение;
- оборудование и технология машиностроения;
- технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств деталей машин.

E-mail: mlk-z@mail.ru.

**Пынькин Александр Михайлович** – заместитель генерального директора ГНПО «Центр».

Научные интересы:

- технологические комплексы концентрированных потоков энергии.

**Семененко Дмитрий Владимирович** – кандидат технических наук, ведущий инженер бюро научно-исследовательских и организационных работ ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси.

Научные интересы:

- неметаллические композиционные материалы и связующие.

**Грецкий Николай Леонидович** – научный сотрудник, ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси.

Научные интересы:

- технология, оборудование и автоматизация машиностроения.

**Антончик Константин Алексеевич** – инженер-электроник, СОАО «Коммунарка».

Научные интересы:

- электроника;
- автоматизация.

Статья поступила в редакцию 03.10.2017.