

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ СДПМ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цыбулькин П.С.

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск,
Республика Беларусь, lfc_29@mail.ru*

Применение синхронных двигателей с постоянными магнитами в современном электроприводе является инновацией, которая призвана повысить эксплуатационные показатели, в том числе энергоэффективность, автоматизированного электропривода. СДПМ обладают рядом преимуществ, таких как: отсутствие обмотки возбуждения на роторе, что обеспечивает уменьшение электрических потерь, повышение КПД и улучшение условий охлаждения двигателя, высокое отношение максимального допустимого момента к моменту инерции двигателя – что предпочтительно для применения в быстродействующем электроприводе, лучшие массогабаритные показатели, что характеризуется высоким отношением номинальной мощности к массе двигателя [1].

Синхронные двигатели с постоянными магнитами — это наиболее перспективные электрические машины в диапазоне малых и средних мощностей (особенно для моментных систем электропривода). Двигатели такого типа конструктивно просты и надёжны. Они имеют абсолютно жёсткие механические характеристики и не требуют затрат на возбуждение, обладают большой перегрузочной способностью и высоким быстродействием в переходных процессах [2].

Однако они имеют ряд недостатков. К ним можно отнести: чувствительность конструкции двигателей к высоким температурам постоянных магнитов, необходимость информации о положении ротора для работы в системах с высокими требованиями по точности и качеству переходных процессов, наличие магнитного поля (даже после выключения) и более высокая цена.

Электропривод на основе СДПМ является перспективным для электроустановок с автономным питанием при повышенных требованиях по надёжности и качеству регулирования скорости.

СДПМ применяются в регулируемых электроприводах в системах автоматического регулирования координат промышленных установок и технологических комплексов, робототехнике, регулируемых приводах электротранспорта. С ростом количества синхронных электроприводов, возрастает актуальность математического моделирования подобных систем, совершенствования имеющихся и разработки новых систем управления электроприводами за счёт улучшения статических и динамических свойств систем при сокращении затрат времени и ресурсов. Высокая эффективность, малые массогабаритные показатели при больших значениях моментов в сравнении с асинхронными двигателями делают СДПМ хорошей альтернативой системе «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель». Высокие динамические свойства СДПМ позволяют использовать их в устройствах обладающих высокой точностью (прецизионных устройствах). Это относится, прежде всего, к системам управления скоростью и положением. Существуют также механизмы, у которых имеется потребность в регулировании электромагнитного момента (например, в системах для управления моментом для точной отработки заданной траектории движения) [3]. В то же время остаётся актуальным улучшение динамических свойств системы управления скоростью СДПМ.

Цель данной работы – анализ методом имитационного моделирования двух способов расчета ПИ-регуляторов для системы управления положением СДПМ.

Суть полеориентированного управления состоит в том, что вектор тока статора, в двухосевой синхронно вращающейся системе отсчёта, имеет две составляющие: ток намагничивания и ток, создающий момент [4].

Созданный крутящий момент двигателя является результатом действия этих токов. При токе намагничивания, поддерживаемом на неизменной номинальной величине ($I_d = 0$), момент двигателя линейно пропорционален току, создающему момент (I_q), что является подобием управления двигателями постоянного тока независимого возбуждения.

При построении математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами принимаются следующие допущения: отсутствует насыщение магнитной цепи, потери в стали, обмотки статора симметричны, индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве.

Для построения структурной схемы трехфазного СДПМ в осях d-q воспользуемся математической моделью СДПМ при расположении постоянных магнитов на поверхности ротора [5]:

$$\begin{aligned} -u_{1d} &= i_{1d} R_1 + \frac{d\psi_{1d}}{dt} - \omega_{эл} \cdot \psi_{1q}, \\ u_{1q} &= i_{1q} R_1 + \frac{d\psi_{1q}}{dt} - \omega_{эл} \cdot \psi_{1d}, \\ M &= p_n \cdot (i_{1q} \psi_{1d} - i_{1d} \psi_{1q}), \\ \psi_{1d} &= L_1 \cdot i_{1d} + \psi_m, \\ \psi_{1q} &= L_1 \cdot i_{1q}, \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned}$$

где I_{1d} , I_{1q} - токи статора по осям d и q; U_{1d} , U_{1q} - напряжения статора по осям d и q; M , M_c - электромагнитный и статический момент электродвигателя; R_1 - активное сопротивление обмотки статора; ω - частота вращения ротора электродвигателя; $\omega_{эл}$ - электрическая частота вращения ротора электродвигателя; p_n - число пар полюсов; J - момент инерции ротора электродвигателя; ψ_{1d} , ψ_{1q} - потокосцепления статора по осям d, q; $L_d = L_q = L_1$ - индуктивности статора по продольной и поперечной осям.

В моделируемой системе электропривода применяется синхронный двигатель с постоянными магнитами BLY172-S-24V-4000 производства компании Anaheim Automation, параметры которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры СДПМ Anaheim BLY172-S-24V-4000 [6]

Параметры двигателя	Величина
Номинальная мощность	53 Вт
Номинальная частота вращения	4000 об/мин
Номинальный ток	3,5 А
Линейное сопротивление	0,8 Ом
Линейная индуктивность	1,2 мГн
Напряжение питания	24 В
Момент инерции	0,00048 кг·м ²
Число пар полюсов	4

По результатам расчета требуемых для моделирования параметров двигателя (по методике приведённой в [5]), получены следующие значения: номинальная угловая скорость $\omega_{ном} = 418,67$ рад/с, номинальный электромагнитный момент $M_{ном} = 0,13$ Н·м, действующее значение номинальной ЭДС $E_{ном} = 21,2$ В, потокосцепление по продольной оси d: $\psi_{1d} = 0,013$ Вб, электромагнитная постоянная времени $T_\Delta = 0,0015$ с, номинальная потребляемая двигателем активная мощность $P_{1ном} = 84$ Вт, номинальный КПД $\eta_{ном} = 63\%$, конструктивная постоянная двигателя $s = 0,037$ Н·м/А, модуль жёсткости механической характеристики $\beta = 0,0017$ Н·м·с/рад, механическая постоянная времени $T_M = 0,0015$ с.

Основной расчётной структуры является управляемый от преобразователя синхронный двигатель с постоянными магнитами. Структура содержит в каналах d и q динамические звенья, учитывающие электромагнитные процессы в цепи статора.

Расчётная структурная схема системы регулирования скорости по поперечной оси q показана на рисунке 1.

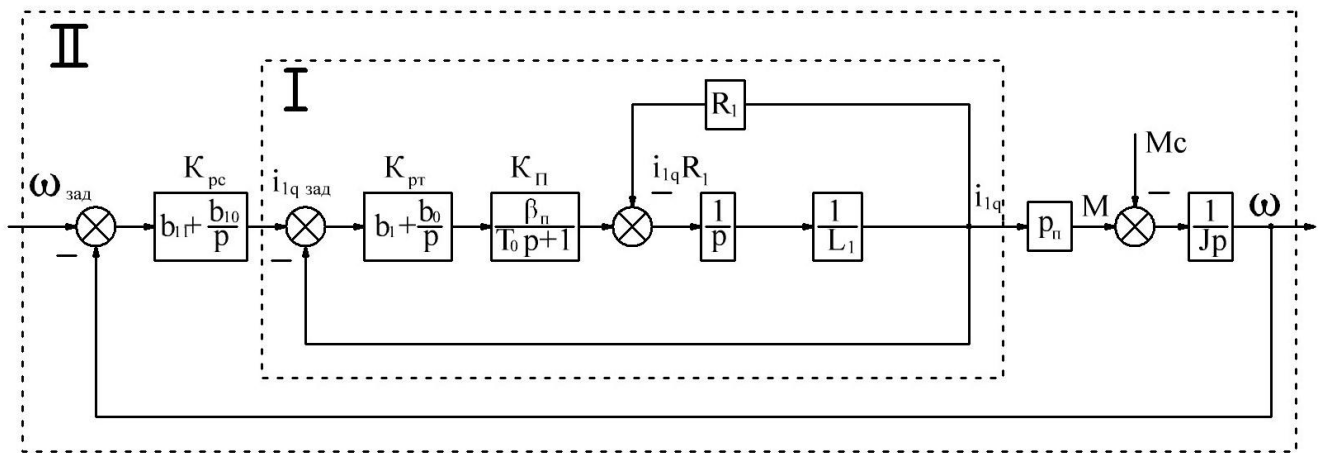


Рисунок 1 – Расчётная структурная схема системы регулирования скорости СДПМ

Система регулирования является двухконтурной: I – контур регулирования тока ($K_{рТ}$ – передаточная функция регулятора тока), II – контур регулирования скорости ($K_{рс}$ – передаточная функция регулятора скорости).

Синтез САУ СДПМ методом последовательной оптимизации контуров находит широкое применение, даже не смотря на то, что основан на ряде допущений. Основное допущение: при синтезе одного контура не учитываются действия остальных контуров. Синтез всегда начинается с внутреннего контура. Метод является менее точным по сравнению с методом модального управления.

Передаточная функция электромагнитного звена двигателя, динамика которого представлена в системе синхронно вращающихся координат, имеет вид:

$$K_{\omega}(p) = \frac{1}{R_s \cdot (T_s p + 1)}.$$

Так как применяем автономный инвертор на базе транзисторных силовых ключей обладающих высоким быстродействием, то постоянную времени преобразователя можно принять равной малой некомпенсированной постоянной времени $T_{\mu}=0,000125$ с.

Далее, для моделирования, рассчитаем передаточные функции регуляторов тока в непрерывной и дискретной формах:

1) Расчет передаточной функции регулятора тока I_q в непрерывной форме.

Передаточную функцию преобразователя можно приближенно представить инерционным звеном:

$$K_{\Pi} = \frac{\beta_{\Pi}}{T_{\mu} p + 1}.$$

Коэффициент усиления преобразователя определяется как отношение наибольших значений амплитуды напряжения преобразователя и амплитуды сигнала управления.

Записываем уравнение разомкнутого контура тока и приравнивая полученную передаточную функцию к желаемой (оптимальной) $K_{ж}$, находим передаточную функцию регулятора тока $K_{рТ}$ [7]. Получаем:

$$K_{рТ} \cdot K_{\Pi} \cdot K_{\omega} = K_{ж};$$

$$K_{рТ} \cdot \frac{\beta_{\Pi}}{T_{\mu} p + 1} \cdot \frac{1}{R_s (T_s p + 1)} = \frac{1}{2T_{\mu} p (T_{\mu} + 1)}.$$

$$K_{PT} = \frac{R_3 \cdot (T_3 p + 1)}{2 \cdot T_\mu p \cdot \beta_{II}} = \frac{b_1 p + b_0}{p}. \quad (1)$$

$$b_1 = \frac{R_3 \cdot T_3}{2 \cdot T_\mu \cdot \beta_{II}};$$

$$b_0 = \frac{b_1}{T_3}.$$

2) Расчет передаточной функции регулятора тока I_q в дискретной форме.

Автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией представляет собой импульсное звено. Регуляторы при программной реализации так же дискретны.

Дискретная передаточная функция данной системы будет иметь вид [8]:

$$W_{ж}(z) = \frac{K_3(z) \cdot K_q(z)}{1 + K_3(z) \cdot K_q(z)},$$

Используя переход к дискретной передаточной функции $K_e(z)$, можно определить передаточную функцию $K_q(z)$ регулятора тока. Переход к дискретной передаточной функции даёт выражение ДПФ для электромагнитного звена двигателя:

$$K_3(z) = \frac{1-d}{R_3 \cdot (z-d)},$$

где $d = \exp(-T_\mu/T_3)$.

Дискретная передаточная функция ПИ-регулятора тока принимает вид:

$$K_q(z) = \frac{b_1 \cdot (z-1+b_0 T_\mu)}{(z-1)},$$

где b_1, b_0 – искомые параметры регуляторов.

Параметры b_1, b_0 должны быть определены исходя из оптимального расположения корней характеристического полинома на плоскости комплексной переменной z .

Характеристический полином замкнутого контура тока имеет вид:

$$N(z) = z^2 - z \cdot (1+d-b_1(1-d)/R_1) + b_1(1-d)/R_1 \cdot (b_0 \cdot T_\mu) + d.$$

Значение желаемых корней $z_{1,2} = \sigma$ или близкие к ним действительные либо комплексные значения $z_{1,2} = \sigma \pm jv$ обеспечивают процессы, близкие к апериодическим. Величина σ может принимать значения 0,5; 0,75; 0,875; 0,9375. В результате получаются параметры регулятора b_1, b_0 :

$$b_1 = \frac{R_1 \cdot (1+d-2\sigma)}{(1+d)}, \quad (2)$$

$$b_0 \cdot T_\mu = \frac{R_1 \cdot (\sigma^2 + v^2 + 1 - 2\sigma)}{(1+d-2\sigma)}.$$

Выбираем желаемое положение корней внутри единичного круга такое, что $\sigma = 0,75$ и $v = 0$ и рассчитываем параметры дискретного регулятора тока:

$$b_1 = \frac{R_1 \cdot (1+d-2\sigma)}{(1+d)} = \frac{0,8 \cdot (1 + e^{-(0,001/0,0015)} - 2 \cdot 0,75)}{(1 + e^{-(0,001/0,0015)})} = \frac{0,02}{1,52} = 0,013,$$

$$b_0 \cdot T_\mu = \frac{R_1 \cdot (\sigma^2 + v^2 + 1 - 2\sigma)}{(1+d-2\sigma)} = \frac{0,8 \cdot (0,75^2 + 1 - 2 \cdot 0,75)}{(1 + e^{-(0,001/0,0015)} - 2 \cdot 0,75)} = \frac{0,0625}{1,02} = 0,06.$$

Синтез регулятора скорости может быть выполнен как для непрерывной системы по условию модульного оптимума.

Исследование динамических свойств полученной системы автоматизированного электропривода произведено путем ее компьютерного моделирования на основании ее имитационного моделирования.

На основании структурной схемы СДПМ построим имитационную модель в приложении Simulink пакета MATLAB. Данные в блоки вводятся в соответствии с расчётными данными электродвигателя и системы управления. Результаты моделирования выводятся на монитор в виде двухмерных графиков.

Имитационная модель представляет собой модель системы векторного частотного управления положения электропривода на основе СДПМ с использованием ШИМ модуляции (частота ШИМ 8 кГц). Моделирование системы выполним для номинального момента двигателя. Момент нагрузки будет подаваться с помощью блока "Step".

Полная схема имитационной модели приведена на рисунке 2.

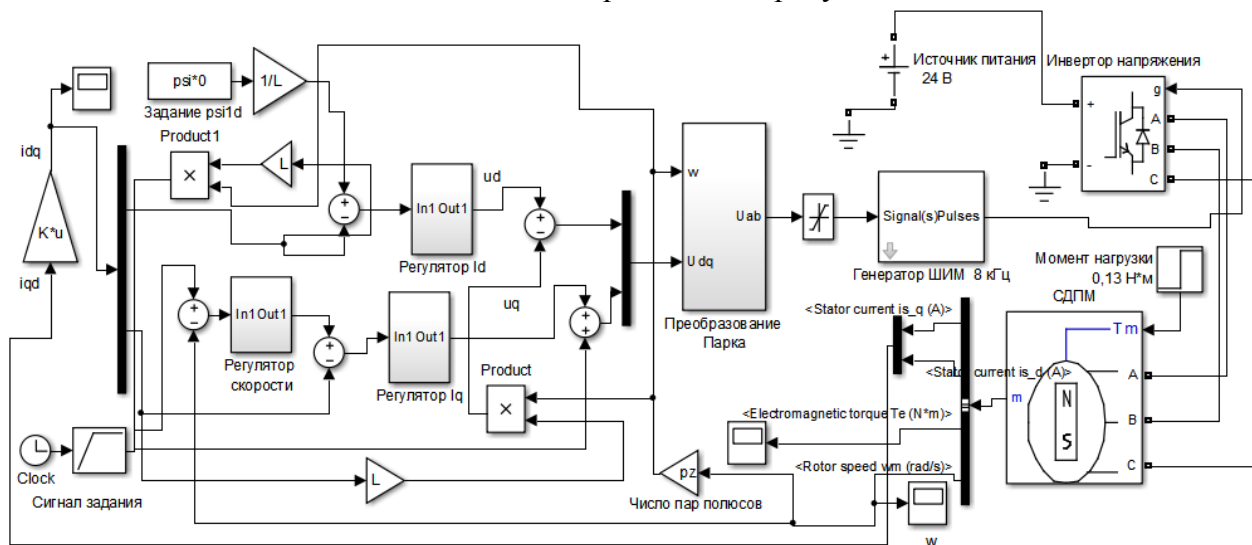


Рисунок 2 – Схема имитационного моделирования ЭП на основе СДПМ

Некоторые элементы реализованы в виде подсистем при помощи блока "Subsystem". Силовой часть схемы включает в себя источник питания (DC Voltage Source), генератор ШИМ-сигнала (PWM Generator), трехфазный мостовой инвертор напряжения (Universal Bridge). В качестве модели СДПМ, используется стандартный блок "Permanent Magnet Synchronous Machine" библиотеки SimPowerSystems. Подсистема системы управления включает в себя ПИ-регуляторы токов по осям d и q, блок задания потокосцепления, а также матрицы фазных и координатных преобразований (реализованы в подсистеме «Преобразование Парка»).

Моделируемый цикл работы двигателя включает в себя разгон двигателя до заданной скорости за 0,05 с. Время подачи статического момента нагрузки $M_c = M_{ном} = 0,13 \text{ Н}\cdot\text{м}$ равняется 0,2 с.

Для получения сигнала задания перемещения, в качестве задатчика интенсивности, используется блок "1-D LookupTable".

Имитационное моделирование системы выполнено для регуляторов с параметрами, рассчитанными по (1) для непрерывной системы (на графиках кривые «а») и с параметрами рассчитанными по формулам (2), с учётом дискретности (на графиках кривые «б»). Зависимость $\omega_{зад} = f(t)$ на рисунке 3 соответствует кривой «в». В результате моделирования получены графические зависимости следующих величин от времени: угловой скорости вала двигателя (рисунок 3), электромагнитного момента (рисунок 4).

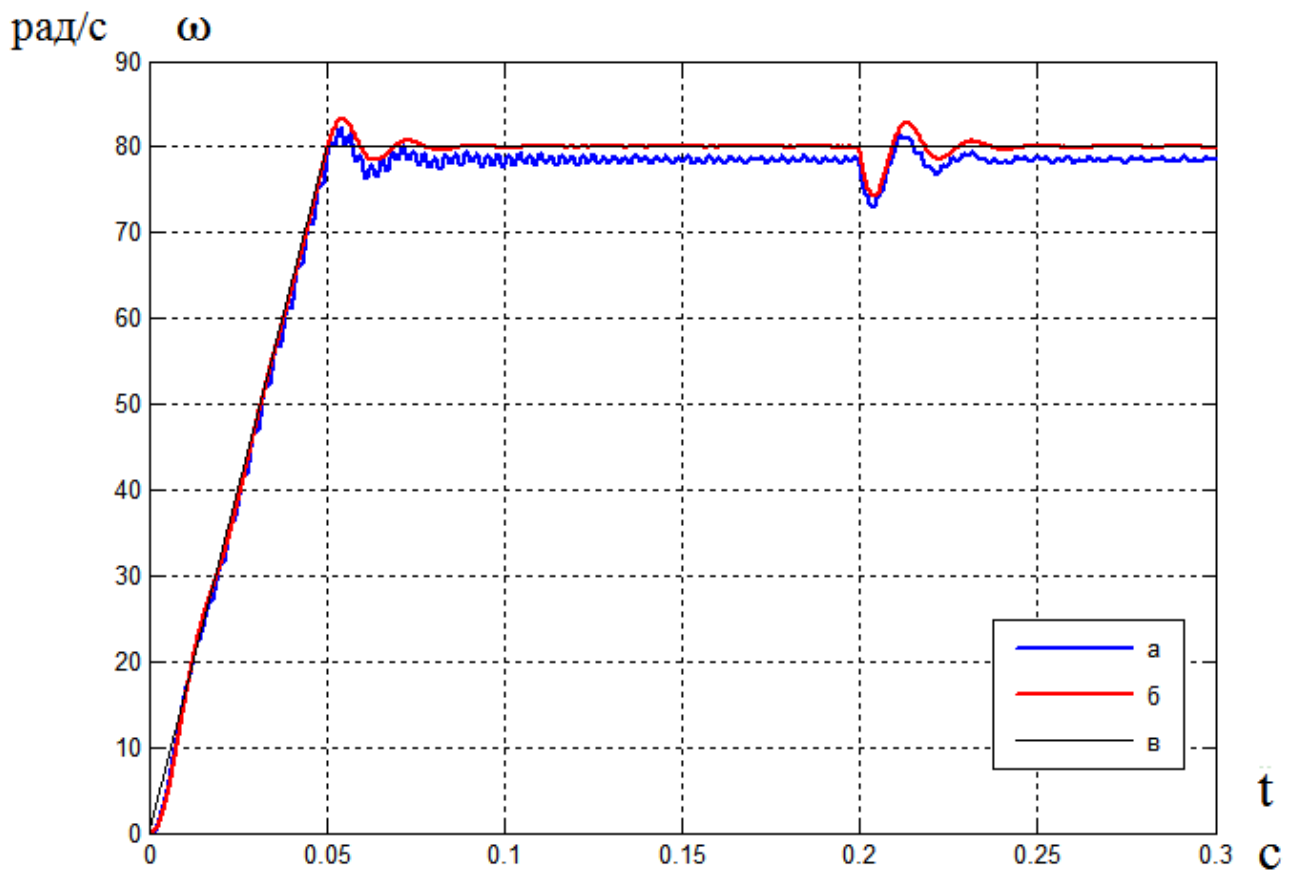


Рисунок 3 – Зависимость $\omega = f(t)$

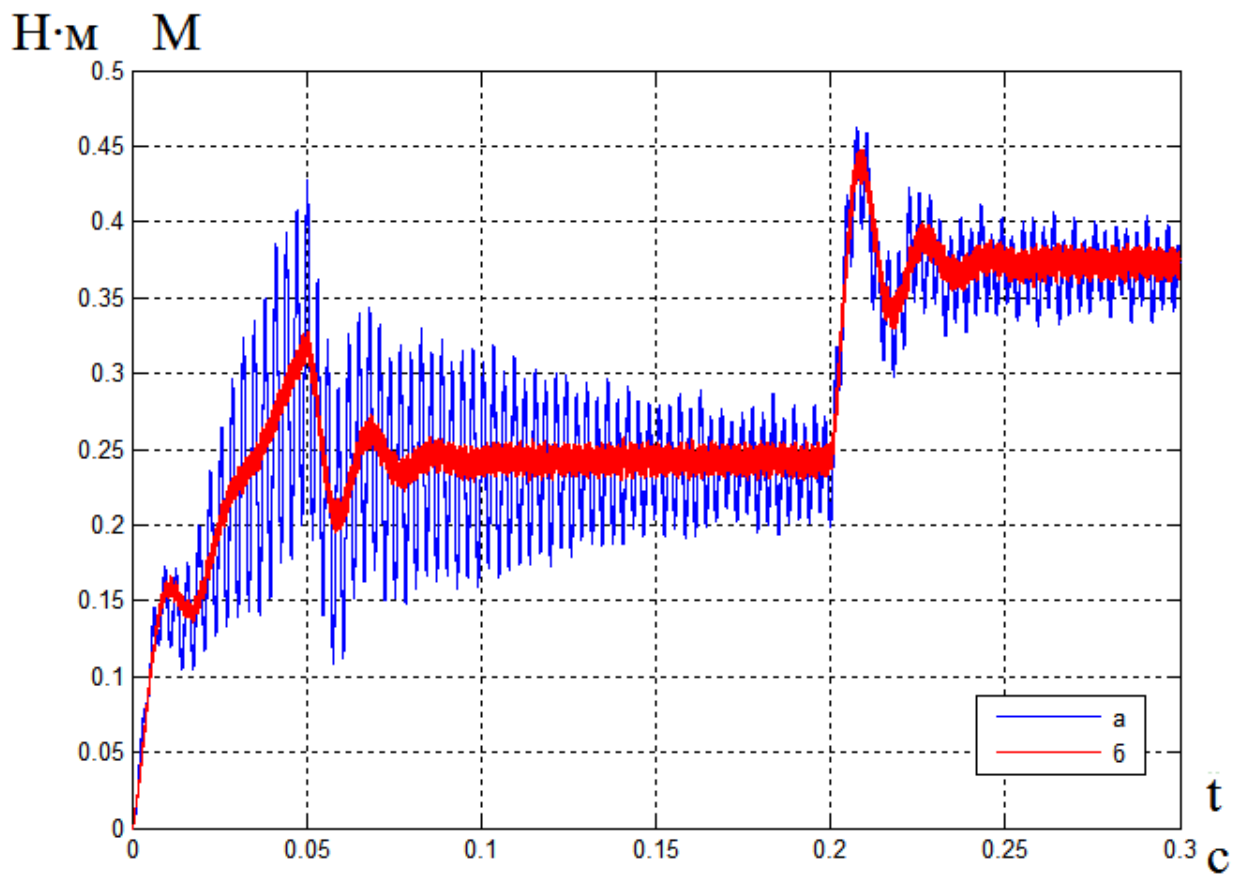


Рисунок 4 – Зависимость $M = f(t)$

Сравнительный анализ показателей качества систем с различными регуляторами будет определяться по следующим динамическим параметрам: величина перерегулирования, время регулирования, число колебаний до установившегося значения за время переходного процесса, постоянство ускорения при пуске.

По результатам моделирования получили:

Перерегулирование по скорости при пуске равно:

$$\sigma_a = \frac{\omega_{a.мвкс} - \omega_{a.уст}}{\omega_{a.уст}} \cdot 100\% = \frac{82,3 - 78,9}{78,9} \cdot 100\% = 4,3\%,$$
$$\sigma_b = \frac{\omega_{b.мвкс} - \omega_{b.уст}}{\omega_{b.уст}} \cdot 100\% = \frac{82,7 - 80}{80} \cdot 100\% = 3,3\%.$$

Величины перерегулирования по скорости при использовании обоих регуляторов не превышают допустимого для электропривода значения в 5%.

Время регулирования: разгон электропривода до номинальной скорости происходит за 0,07 с., что незначительно превышает заданное значение равное 0,05 с.

Число колебаний до установившегося значения у обеих систем равняется двум. Однако у непрерывной системы наблюдаются небольшие колебания угловой скорости на протяжении всего цикла работы.

Процесс пуска у обеих систем происходит с примерно постоянным ускорением, без рывков, что удовлетворяет требованиям качества переходного процесса.

Электромагнитный момент во время переходных процессов не превышает допустимый, для данного типа двигателя, тем не менее у непрерывной системы момент в процессе работы колеблется в широком диапазоне, что приводит к дополнительным потерям энергии и уменьшает срок эксплуатации двигателя, что приводит к дополнительным потерям энергии и уменьшает срок эксплуатации двигателя.

По результатам сравнительного анализа динамических свойств можно сделать следующий вывод: система регулирования скорости СДПМ с расчётом ПИ-регулятора в дискретной форме даёт лучшие динамические показатели управлением скорости, чем в случае подчинённого регулирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нго, Фьонг Ле. Расчет индуктивностей синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами / Фьонг Ле Нго, Г.И.Гульков // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2017. - №1. – С. 41 – 53.
2. Мичурин, Р.А. Моделирование работы синхронного двигателя с постоянными магнитами в среде Simulink / Р.А. Мичурин // Электронные информационные системы. – М.: АО «НТЦ ЭЛИНС». – 2017. – № 3. – С. 23-32.
3. Абд Эль Вхаб Амр Рефки. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом / Абд Эль Вхаб Амр Рефки, А.С. Каракулов, Ю.Н. Дементьев // Известия Томского политехнического университета. - 2011. - Т. 319. № 4. – С. 93-99.
4. Фираго, Б. И. Теория электропривода: Учеб.пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик // Мн.: Техноперспектива, 2004.
5. Фираго, Б.И. Векторные системы управления электроприводами. Учеб.пособие / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев // - Мн.: Вышэйшая школа, 2016.
6. Электронный источник: <http://www.anaheimautomation.com/products/brushless/brushless-motor-item.php?sID=143&pt=i&tID=96&cID=22> – Параметры СДПМ.
7. Анхимюк, В.Л. Теория автоматического управления / В.Л. Анхимюк, О.Ф. Опейко, Н.Н. Михеев // Мн.: Дизайн РО, 2000.
8. Опейко, О.Ф. Синтез регулятора тока системы векторного управления асинхронным электродвигателем / Вестник КрНУ имени Михайла Остроградського. Выпуск 1/2014.