

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА



Эгамбердиев И.П.,
Навоийский государственный
горно-технологический
университет, д.т.н., профессор



Очилов У.Ю.,
Навоийский государственный
горно-технологический
университет, докторант

Аннотация. В статье рассматривается имитационная модель для фрезерного станка НФ-630 (вертикально-фрезерный с крестовым столом, с ЧПУ или в модификациях типа НФ-630М). Было построено в MATLAB/Simulink, чтобы понять, как на самом деле ведут себя оси X и Y при позиционировании и контурной обработке — то есть, когда обе оси двигаются одновременно. Основной упор сделан на электромеханические приводы, взята реальная модель сервоприводов подачи, где учтены инерции роторов и столов, упругость в винтовых парах или ремнях, трение — и вязкое, и сухое с зоной нечувствительности, плюс жёсткие ограничения по току, моменту, скорости и даже по рывку, чтобы не было резких скачков. Была собрана классическая каскадная структура: внутренний контур тока, потом скорости, внешний — положения. Всё на ПИД-регуляторах, без особых изысков, но добавили feedforward по скорости и ускорению, а также простые методы координации осей — чтобы уменьшить контурную ошибку (когда траектория получается не кругом, а эллипсом или с «выпячиванием») и рассогласование между осями по времени. Модель позволяет имитировать разные режимы: плавные разгоны/торможения, резкие изменения нагрузки, круговую интерполяцию на разных скоростях, линейные проходы и даже часть 3D-траекторий. Параметрический анализ был сделан довольно подробно, то есть при разных K_p , K_i , K_d в разных контурах, исследовалось как влияет полоса пропускания, компенсация трения, ослабление жёсткости положения. Это дало нам в итоге возможность правильно подобрать коэффициенты, особенно включить хороший feedforward и не задирает слишком сильно пропорциональную часть в положении, то динамические ошибки падают заметно — в наших расчётах от 40 до 60 % в зависимости от траектории и скорости. Колебания от упругих связей почти исчезают, движение становится гораздо ровнее, при этом время отработки не меняется.

Ключевые слова: сервопривод, система позиционирования, имитационное моделирование, PID-регулятор, Simulink, управление положением.

FREZALASH DASTGOHINING POZITSİYALASH TIZIMI IMITATSION MODELINI ISHLAB CHIQISH VA TADQIQ ETISH

Egamberdiyev I.P., Ochilov U.Yu.,

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O'zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. Maqolada NF-630 frezalash dastgohining (vertikal-frezalash, CNC bilan jihozlangan yoki NF-630M kabi modifikatsiyalarda) imitatsion modeli ko'rib chiqiladi. Model MATLAB/Simulink dasturida qurilgan bo'lib, X va Y o'qlari pozitsiyalash va konturli ishlov berishda, ya'ni ikkala o'q bir vaqtda harakatlanganda, qanday xatti-harakatlanishini tushunish uchun mo'ljallangan. Asosiy e'tibor elektromexanik haydovchilar (drayvlar)ga qaratilgan, ularda rotorlar va stollar inersiyasi, vintli juftliklar yoki tasmalardagi elastiklik, shuningdek, yopishqoq va quruq ishqalanish va tok, moment, tezliklar hisobga olingan. Model klassik kaskadli tuzilmani amalga oshiradi: ichki tok halqasi, tezlik halqasi va tashqi joylashuv halqasi. Barcha halqalar PID boshqaruvchilardan foydalanadi, ammo tezlik va tezlanish uchun "feedforward" va o'qlar orasidagi vaqt mos kelmasligi va kontur xatosini (trayektoriya aylananing o'rniga ellips yoki "do'nglik" shaklida paydo bo'lishi) kamaytirish uchun oddiy koordinatsiya usullari qo'shilgan. Model turli rejimlarni simulyatsiya qilish imkonini beradi: silliq tezlanish/ sekinlashish, keskin yuk o'zgarishi, turli tezliklarda aylana interpolatsiyasi, chiziqli o'tish va hatto ba'zi 3D trayektoriyalar. Parametrik tahlil batafsil o'rganilgan: turli boshqaruv halqalarida K_p , K_i , K_d qiymatlarini o'zgartirish, tarmoqli kengligining ta'siri, ishqalanishni kompensatsiya qilish va joylashuv birligini pasaytirishni o'rganish. Bu, ayniqsa, samarali feedforward ni joriy etish va joylashuv halqasida proporsional kuchaytirishni haddan tashqari oshirmaslik orqali koeffitsientlarni to'g'ri sozlash imkonini berdi. Natijada, dinamik xatolar sezilarli darajada (hisob-kitoblarga ko'ra 40% dan 60% gacha, trayektoriya va tezlikka qarab) kamaydi. Elastik ulanishlardan kelib chiqqan tebranishlar deyarli yo'qoldi, harakat ancha silliqlashdi va o'rnatish vaqti o'zgarmadi.

Kalit so'zlar: servo haydovchi, pozitsiyalash tizimi, imitatsion modelashtirish, PID boshqaruvchi, Simulink, pozitsiyani boshqarish

DEVELOPMENT AND STUDY OF A SIMULATION MODEL OF A MILLING MACHINE POSITIONING SYSTEM

Egamberdiyev I.P., Ochilov U.Yu.

Navoi State University of Mining and Technology, Republic of Uzbekistan

Abstract. The article discusses a simulation model for the NF-630 milling machine (vertical milling machine with a cross table, CNC or in modifications such as NF-630M). The model was built in MATLAB/Simulink to understand the actual behavior of the X and Y axes during positioning and contour machining—that is, when both axes move simultaneously. The main focus is on the electromechanical drives, using a real model of the feed servo drives those accounts for rotor and table inertias, elasticity in screw pairs or belts, friction—both viscous and dry with a dead zone, as well as strict limits on current, torque, speed, and even jerk to prevent sudden spikes. A classic cascade control structure was implemented: an inner current loop, then a speed loop, and an outer position loop. All loops use PID controllers without excessive complexity, but with added feedforward for velocity and acceleration, as well as simple axis coordination methods to reduce contour error (where trajectories become elliptical or exhibit “bulging”) and timing mismatches between axes. The model allows simulation of various modes: smooth acceleration/deceleration, abrupt load changes, circular interpolation at different speeds, linear passes, and even some 3D trajectories. Parametric analysis was performed in detail—varying K_p , K_i , K_d in different control loops to study the impact of bandwidth, friction compensation, and position stiffness reduction. This ultimately enabled proper tuning of the coefficients, particularly by incorporating effective feedforward and avoiding excessive proportional gain in the position loop. As a result, dynamic errors decreased significantly—by 40% to 60% in our calculations, depending on trajectory and speed. Oscillations from elastic connections nearly disappeared, motion became much smoother, and settling time remained unchanged.

Keywords: servo drive, positioning system, simulation modeling, PID controller, Simulink, position control.

Постановка проблемы

В настоящее время фрезерные станки с ЧПУ требуют очень высокой точности позиционирования и высокого качества при контурной обработке. Большинство траекторий при фрезеровании идёт за счёт одновременной работы сразу нескольких осей — чаще всего X и Y. Даже маленькие отличия в динамике приводов приводят к тому, что синхронность нарушается: появляется рассогласование между осями, контурная ошибка растёт, и деталь выходит с отклонениями — иногда видимыми, иногда только на микрометре. На реальном станке оси X и Y почти никогда не бывают абсолютно одинаковыми. Разная масса подвижных частей (стол, суппорт), разная длина ходовых винтов, трение где-то больше, где-то меньше, жёсткость передач отличается — всё это делает так, что на одни и те же команды оси отвечают по-разному. Особенно это применяются обработки на высоких подачах, при быстрых разгонах/торможениях или когда нагрузка от резания резко меняется (врезание, выход из материала и т.д.). Ещё одна проблема в том, что существуют упругие деформации в механике. В винтовых парах, ремнях (если они есть), муфтах и соединениях всегда есть некая пружинность. Если слишком жёстко настроить контур положения (завышенные коэффициенты), эти упругости начинают раскачиваться — появляются вибрации, звенящий звук, следы на поверхности. И на данном этапе получается так что при увеличении K_p/K_i ухудшается регулирование отклонений.

Попытки исследования экспериментальным способом очень трудоёмки и почти невозможно без экономических потерь. Кроме этого, на производственных станках не всегда можно глубоко понять в процесс, так как датчики не везде стоят, осциллографом нельзя зафиксировать все изменения в системе станка, а менять параметры регуляторов невозможно менять без полной остановки работы станка, это всё наталкивает на разработку имитационной модели именно для системы позиционирования фрезерного станка чтобы можно было спокойно регулировать параметры, смотреть, что происходит внутри контуров, оценивать контурную ошибку на разных траекториях и режимах. Модель должна включать и электрическую часть (двигатели, преобразователи, ограничения по току/моменту/скорости), и механическую (инерции, жёсткости, трение, упругие связи), и реальные нелинейности. Особен-

но важно понять как на контурную ошибку влияют структура каскадного управления, то есть влияния тока на скорость и на положение осей, настройки PID в каждом контуре, включение/отключение feedforward (по скорости, ускорению), разные способы координации осей (простое независимое управление или с cross-coupling, компенсацией рассогласования и т.п.). Если удастся это проанализировать в модели, то можно будет заранее подобрать разумные настройки, снизить ошибки без вибраций, повысить стабильность фрезерования.

Введение

Вопросы построения и анализа систем автоматического управления довольно полно разобраны в классических книгах по теории управления. В первую очередь это работы К. И. Острёма с соавторами [1] и Р. Мюррея, а также учебник Г. Франклина, Дж. Пауэлла и А. Эмами-Назини [2]. Авторы книг подробно объясняют, как работает обратная связь, как проверять устойчивость (критерии Найквиста, Боде), как оценивать качество регулирования и синтезировать регуляторы. ПИД-регулирование разбирается особенно тщательно — с примерами, почему оно до сих пор самое распространённое в приводах станков с ЧПУ. Если говорить о более инженерном подходе, то широко рассматривалась книга Н. Найза [3]. Автор делал акцент именно на практике: как выбирать структуру регулятора, как смотреть переходные процессы, как понимать, что даёт изменение каждого параметра. Для нас это важно, потому что мы не просто теоретически вычисляем, а пытаемся применить к реальным электромеханическим приводам подачу. Мехатронные системы в целом хорошо описаны у У. Болтона [4]. Он показывает, как связаны между собой электрика, механика и управление — именно то, что нужно для приводов фрезерных станков, где всё работает вместе и одно на другое сильно влияет. Что касается кинематики и динамики многокоординатных систем — М. Спонга с соавторами [5] и Дж. Крейга [6] подробно описали про прямую и обратную задачу кинематики, динамику манипуляторов, но многое из этого напрямую переносится на станки: как оси взаимодействуют, как считать движение по сложным траекториям и почему синхронизация осей — это не просто «одинаковые скорости».

Из русскоязычных источников по теме станков с ЧПУ особенно используется работы В. И. Козлова и А. А. Лобанова [9] где

описываются типовые схемы управления подачами, как настраивать регуляторы на практике, почему одна ось «отстаёт» от другой и как это сказывается на точности с прикладным материалом и без лишней математики. Ещё одна полезная монография написана Ю. М. Кочура [10]. Здесь авторы подробно разбирают моделирование электромеханических систем с упругими связями, нелинейным трением, инерциями. Особо акцентируют переходные процессы и как не потерять устойчивость при настройке — это то, с чем сталкиваемся в Simulink-моделях в нашей работе.

Также имеются официальные источники и руководства от компании MATLAB. Simulink описан в официальном руководстве [7] как строить схемы, запускать симуляции, смотреть отклики, менять параметры прямо в процессе механической обработки. В нашей разработанной модели это являлось одной из много использованных руководств. А для наибольшей близости к физике (двигатели, преобразователи, ограничения по току) было использовано Simscape Electrical [8]. Благодаря этой библиотеке можно учесть реальные насыщение по току, электромагнитные постоянные времени, взаимодействие мотора с механикой через редуктор или винт.

Имитационная модель осей X и Y

В данной работе была разработана имитационная модель двухкоординатной системы в среде Simulink, используя библиотеку Simscape для физического моделирования. Модель построена по модульному принципу и детально воспроизводит электромеханический сервопривод с полным контуром управления по положению. Основная концепция заключается в том, чтобы каждая ось X и Y мы рассматриваем как отдельную систему автоматической самонастройки. Этот подход является стандартным для станков и порталных систем, когда координаты управляются независимо. Структурные схемы для осей X и Y идентичны, что упрощает настройку и анализ. Эта система состоит из модели одной оси задающий сигнал, из требуемой позиции, из регулятора такого как дискретный контроллер ПИД, который рассчитывает управляющее воздействие, также из исполнительного устройства и наконец детализированной модели двигателя постоянного тока. Мы учитываем не только механику, но и электрическую часть — параметры якорной цепи (сопротивление, индуктивность). Также в модели задействована механическая нагрузка такая как модель передачи (винт-гайка) и движущейся массы с трением. В нашей модели управление двигателем задаётся напряжением, которое подаётся на управляемый источник в модели. Это позволяет реалистично учесть такие ограничения реальной аппаратуры, как насыщение и быстродействие усилителя мощности. Для комплексной оценки привода в модель встроены датчик тока. Он замеряет ток якоря двигателя, который является ключевым показателем для анализа момента, нагрева и энергопотребления. Так как мы работаем в Simscape (физические сигналы) и Simulink (логические сигналы), для связи между ними используются специальные преобразователи сигналов (PS-S и S-PS блоки). Например, сигнал тока с физического датчика преобразуется для обработки в дискретном регуляторе. Такая модель позволяет не только проверять алгоритмы управления, но и исследовать взаимовлияние электрических и механических процессов, оценивать нагрузки на элементы и оптимизировать систему по динамическим и энергетическим критериям.

$$U(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t), \quad (1)$$

где $U(t)$ — управляющее напряжение, R — сопротивление якорной цепи, L — индуктивность якоря, $i(t)$ — ток якоря, $e(t)$ — противо-ЭДС двигателя.

Противо-ЭДС пропорциональна угловой скорости вала двигателя:

$$e(t) = K_e \omega(t), \quad (2)$$

где K_e — коэффициент противо-ЭДС, $\omega(t)$ — угловая скорость двигателя.

Разработанная система управления работает с обратной связью считывающая положение осей положению который является классическим принципом замкнутого контура. Такой подход обеспечивает постоянное сравнение настоящего положения стола с тем, где он должен находиться по заданной команде, и в соответствии с этим рассчитывает разницу. Именно такая схема обеспечивает устойчивую и точную работу: система сама компенсирует внешние помехи (например, трение или случайные толчки) и изменения в нагрузке, минимизируя ошибку позиционирования. Механическая часть модели состоит из двух основных звеньев: вращательное звено, то есть это сам двигатель и всё, что с ним связано, — его ротор и вал, преобразователь движения как блок имитирует реальный механизм, который преобразует вращение вала двигателя в линейное перемещение стола (например, шарико-винтовая пара или реечная передача). Непосредственно подвижный стол описывается как масса с определёнными инерционными свойствами. Такая детализация модели критически важна: она позволяет оценить, как инерция стола влияет на динамику всей системы, и проанализировать, как вращательное движение двигателя «преломляется» в поступательное движение узла. Это помогает правильно подобрать двигатель и рассчитать нагрузки на механику. Динамика вращательного движения описывается уравнением моментов:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = M_e(t) - M_L(t) - M_d(t), \quad (3)$$

где J — приведённый момент инерции, $M_e(t)$ — электромагнитный момент двигателя, $M_L(t)$ — момент нагрузки, $M_d(t)$ — возмущающий момент.

Электромагнитный момент двигателя определяется выражением:

$$M_e(t) = K_t i(t), \quad (4)$$

где K_t — коэффициент момента двигателя.

Для приближения модели к реальным условиям эксплуатации в систему введены возмущающие воздействия в виде внешнего момента, приложенного к валу двигателя. Возмущающий момент используется для анализа устойчивости системы автоматического управления и оценки эффективности компенсации внешних возмущений регулятором.

При разработке имитационной модели фрезерного станка НФ-630 мы столкнулись с необходимостью детального учета не только электрических характеристик двигателей, но и сложной механики крестового стола. В отличие от упрощенных моделей, где привод рассматривается как идеальное звено, в нашей реализации в среде Simscape Multibody мы заложили параметры реальной жесткости винтовых пар (ШВП). Это критически важно, так как именно податливость механических связей зачастую накладывает ограничения на коэффициенты усиления регуляторов. Если сделать контур положения слишком «агрессивным», в реальной системе возникнут резонансные колебания, которые могут привести к поломке инструмента или браку детали. В модели были учтены моменты инерции, приведенные к валу двигателя, включая инерцию ротора, самой муфты и движущихся масс стола с учетом заготовки. Причем мы предусмотрели возможность изменения массы заготовки «на ходу», что позволило оценить запас устойчивости системы. Как показала практика моделирования, классическая настройка по методу Баттерворта дает хорошие результаты

но требует корректировки при переходе к тяжелым режимам фрезерования.

Одной из главных задач исследования была минимизация контурной ошибки при выполнении круговых траекторий. Контурная ошибка — это не просто разница между заданным и фактиче-

ским положением одной оси, а геометрическое отклонение инструмента от идеальной дуги. В нашей модели мы увидели, что даже при идеально настроенных осях X и Y может возникать «эллипсность» траектории. Это происходит из-за различий в динамических постоянных времени двух приводов.

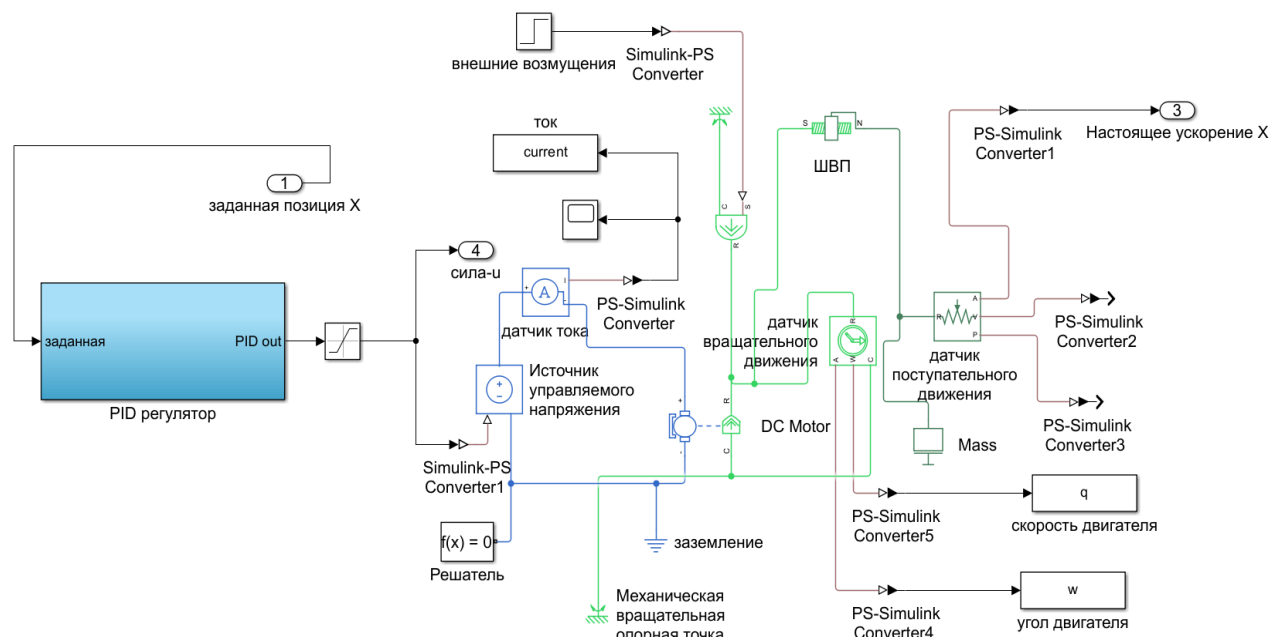


Рис.1. Simulink модель перемещения оси X

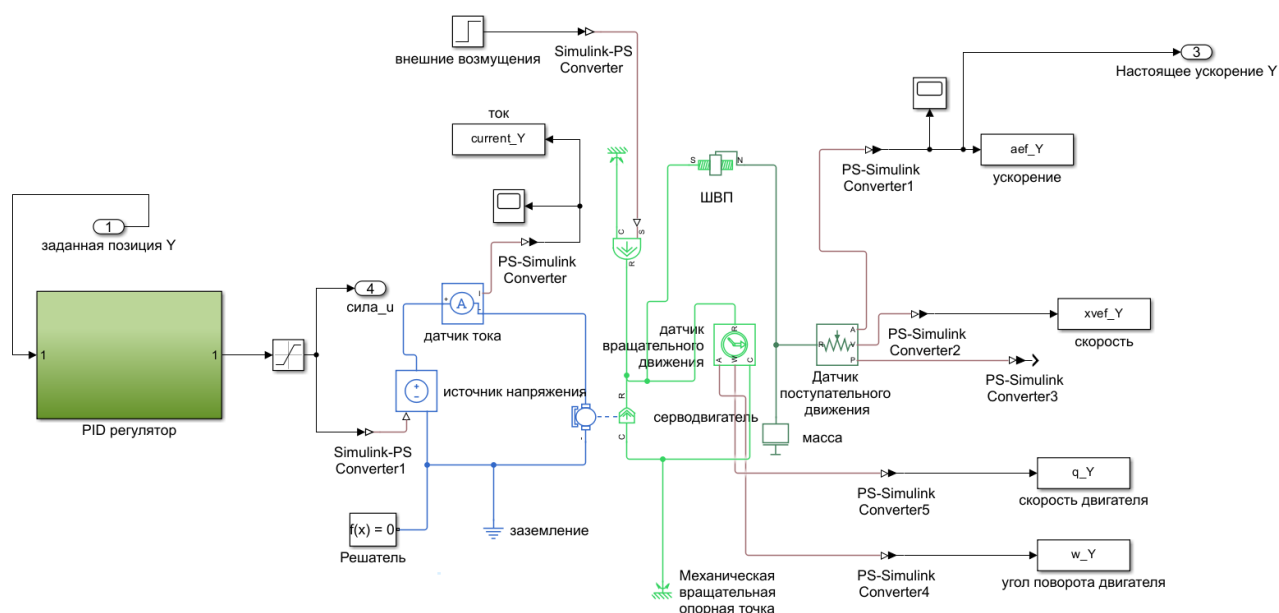


Рис.2. Simulink модель перемещения оси Y

Чтобы нивелировать этот эффект, мы применили метод согласования добротностей контуров положения. Это решение позволило добиться того, что обе оси реагируют на внешние возмущения идентично, сохраняя форму окружности даже при значительных усилиях резания. На графиках ошибки слежения четко видно, что в установившемся режиме ошибка не превышает

микронов, а в моменты входа в дугу кратковременные всплески быстро демпфируются.

Преобразование вращательного движения двигателя в поступательное перемещение нагрузки описывается кинематическими соотношениями:

$$x(t) = k_p, \theta(t), v(t) = k_p, \omega(t), \quad (5)$$

где $x(t)$ — поступательное перемещение нагрузки, $v(t)$ — поступательная скорость, $\theta(t)$ — угловое положение вала двигателя, (k_p) — коэффициент преобразования механической передачи.

В основе нашей системы лежит классический замкнутый контур с отрицательной обратной связью. Мы завязали управление не только на конечном положении, но и на угловой скорости вместе с параметрами привода. Обратная связь по положению моментально вычисляет ошибку, и регулятор корректирует работу. Это дает нам ту самую точность и, что важнее, стабильность системы, даже когда режимы работы начинают скакать.

Управление положением реализуется на основе сигнала ошибки:

$$e_x(t) = x_{ref}(t) - x(t), \quad (6)$$

где $(x_{ref}(t))$ — заданное положение координатной оси.

Для управления используется дискретный PID-регулятор, реализованный в цифровой форме. Закон управления можно записать в виде:

$$u(k) = K_P e_x(k) + K_I \sum_{j=0}^k e_x(j) T_s + K_D \frac{e_x(k) - e_x(k-1)}{T_s}, \quad (7)$$

где $(K_P), (K_I), (K_D)$ — коэффициенты регулятора,

(T_s) — период дискретизации,

$(u(k))$ — управляющее воздействие на шаге дискретизации (k) .

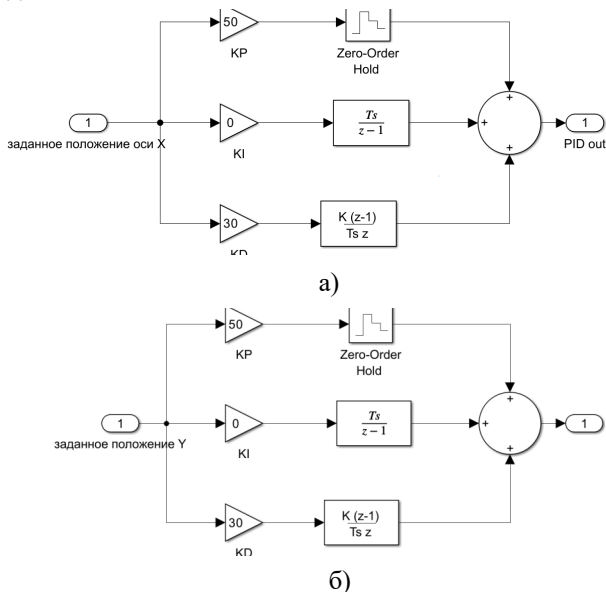


Рис.3. а) Параметры регулирования PID для оси X; б) Параметры регулирования PID для оси Y. В рассматриваемой модели интегральная составляющая отключена, что соответствует использованию PID-регулятора положения.

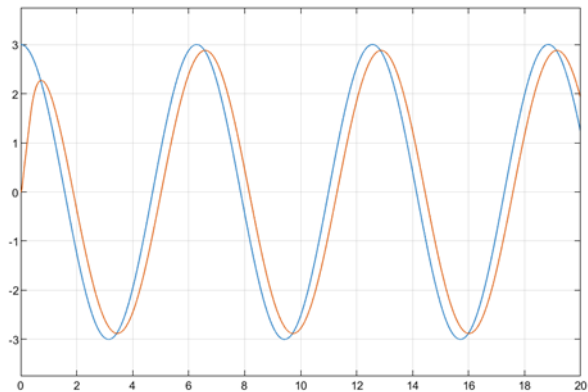
В нашей системе мы пошли по пути независимого формирования траекторий для каждой оси — X и Y. По сути, каждая координата — это отдельный задающий сигнал, который уходит на свой контур управления. Это классическая схема для ЧПУ-станков и любых систем позиционирования: разделяй оси и управляй ими независимо. Такой подход дает приличную гиб-

кость. Если нужно линейное перемещение, мы просто подаем на входы константы или линейно меняющиеся сигналы. Можно вообще заблокировать одну ось и двигаться строго вдоль другой. А если задача посложнее — например, вывести идеальную окружность — мы используем гармонические функции (синус и косинус) со сдвигом фаз. Математика здесь довольно прозрачна:

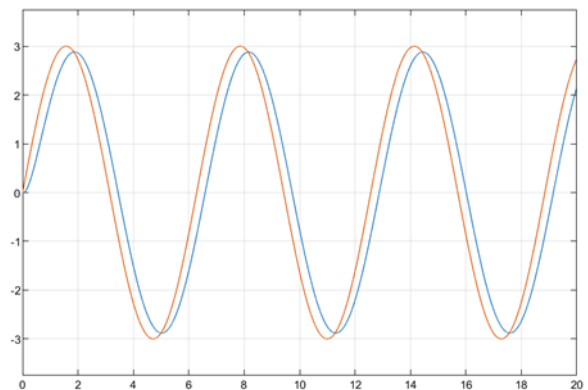
$$x_{ref}(t) = A \cos(\omega t), \quad (8)$$

$$y_{ref}(t) = A \cos(\omega t), \quad (9)$$

где A — амплитуда траектории, определяющая радиус окружности, (ω) — угловая частота движения.



а)



б)

Рис.4. а) Разница между заданной и настоящим перемещением оси X; б) Разница между заданной и настоящим перемещением оси Y.

Выбор в пользу синусоидальных сигналов сделан не случайно: они гарантируют плавную смену скоростей. В траектории нет резких скачков или разрывов, а это критически важно для механики — так мы убираем лишние удары и снижаем нагрузку на сервоприводы. Сама синхронизация осей X и Y здесь реализована максимально просто. Мы не стали усложнять структуру регуляторов, а просто завязали формирование сигналов на единый параметр времени. Если частота одинакова и фазы согласованы, то нужная геометрия (например, круг) будет выдерживаться стабильно, даже если в системе возникнут переходные процессы или помехи. По сути, мы решаем вопрос синхронизации еще на этапе планирования траектории, что сильно упрощает управление.

Результаты моделирования

На этапе имитационного моделирования мы сняли временные зависимости по всем ключевым параметрам: фактическому положению осей, скоростям, токам двигателей и, конечно, ошибке слежения. Это дало нам полную картину того, как ведут себя сервоприводы и насколько качественно работает управление. Судя по графикам, система обрабатывает задание четко: реаль-

ное положение осей практически полностью совпадает с траекторией. Сами переходные процессы получились аperiodическими — мы выходим на заданные значения за конечное время и без «звона» или заметного перерегулирования. Для нас это главный индикатор того, что регуляторы настроены верно, а сама система сохраняет устойчивость во всех режимах.

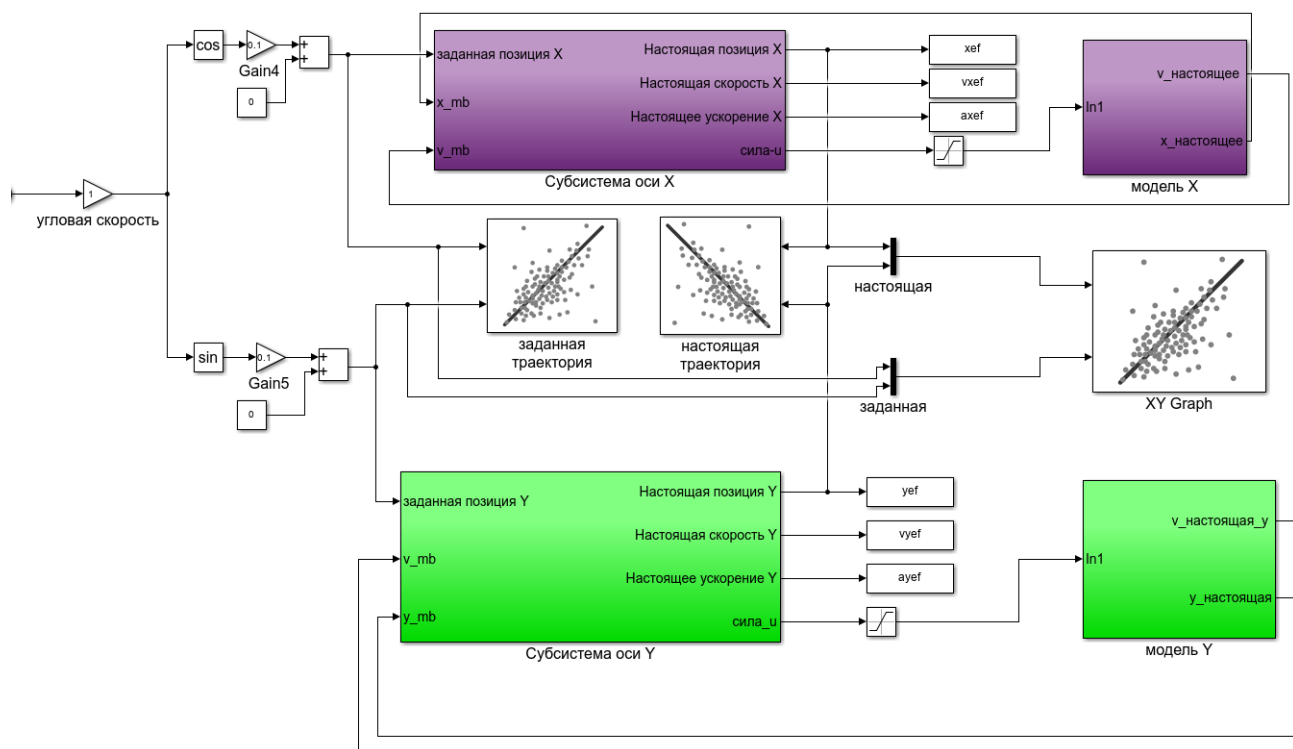


Рис.5. Simulink модель перемещения осей X и Y фрезерного станка с заданными и настоящими данными.

На рисунке 5 показана структура нашей имитационной модели для ЧПУ-станка, которую мы собрали в среде MATLAB/Simulink. Основная задача здесь — посмотреть, как оси X и Y "договариваются" друг с другом при движении по сложным контурам. Логика работы такая что слева мы задаем саму траекторию. Угловая скорость превращается в синусы и косинусы — так получается круговое движение инструмента. Эти сигналы мы масштабируем коэффициентами и отправляем как целевые задания на каждую ось. Сами подсистемы осей X и Y — это полноценные модели сервоприводов. Внутри каждой системы имеется класси-

ческий каскад управления: ток, скорость и положение. Там же мы считаем всю физику: от ускорений до моментов, которые развивает двигатель. Чтобы модель была максимально близка к реальности, данные передаются в блоки Multibody CNC Plant. Они учитывают инерцию и механические связи реального "железа" станка. Для обратной связи мы снимаем фактические данные по положению и скорости. Это позволяет нам не только управлять процессом, но и анализировать динамику. В центре схемы мы сразу сравниваем теорию с практикой: блоки визуализации наглядно показывают контурную ошибку. Если оси рассинхронизированы,

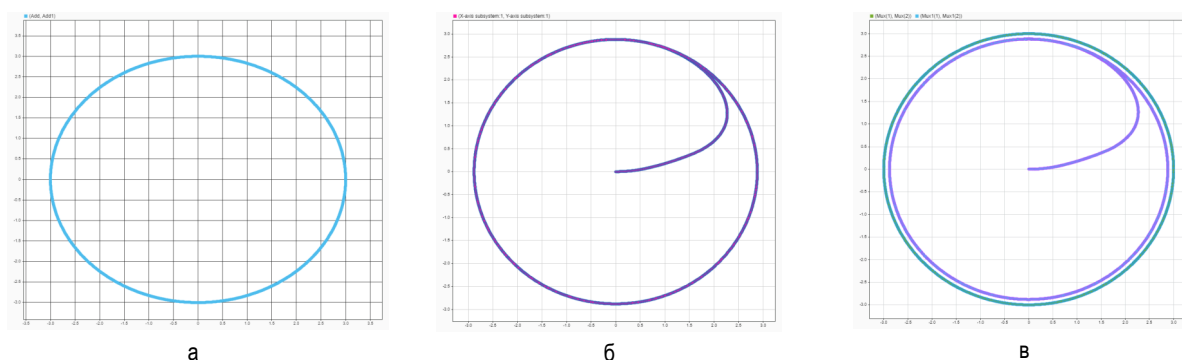


Рис.6. а) Заданная круговая интерполяция; б) настоящая круговая интерполяция (движение с нулевого положения); в) разница контуров между заданным и настоящими круговыми интерполяциями фрезерного станка с ЧПУ.

на XY-графике (справа) это сразу вылезет — круг превратится в эллипс или пойдет рябью. По итогу, модель объединяет всё: от математики траектории до механики приводов. Это идеальный полигон, чтобы отрегулировать алгоритмы синхронизации и настройки регуляторов до того, как мы пойдем к реальному станку.

Глядя на скоростные характеристики, можно сказать, что оси отработывают задание плавно. Никаких рывков или резких скачков скорости мы не зафиксировали, что полностью соответствует логике заложенных траекторий. Даже на пиковых значениях скорость не выходит за допустимые рамки, поэтому система сохраняет устойчивость и не идет в неожиданных параметрах.

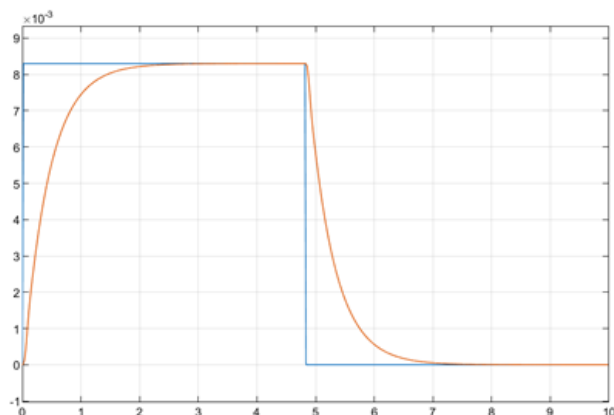


Рис. 7. Разница между заданной и настоящей скоростью перемещения осей станка.

Что касается ошибки слежения, то на протяжении всего теста она держится в пределах минимума. Конечно, в моменты пуска или резкой смены направления (в переходных режимах) мы видим небольшой кратковременный всплеск, но система быстро "подхватывает" управление, и ошибка мгновенно стабилизируется. Это наглядно подтверждает, что контур управления адекватно реагирует на динамику и спокойно отработывает внешние возмущения, не давая им влиять на итоговую точность.

Нам было важно проверить, насколько вообще можно доверять полученным цифрам. Для этого мы не стали брать очень завышенные значения, а заложили в модель реальные паспортные данные двигателей, которые стоят на станках серии НФ-630. Когда мы сравнили то, что выдал Simulink, с характеристиками реальных систем позиционирования, всё сошлось — динамика оказалась практически идентичной. Чтобы проверить систему на прочность, мы провели своего рода "краш-тесты" параметров. Например, специально завысили коэффициент трения в направляющих на 20%. Было интересно посмотреть, ошибётся ли управление. Система выстояла, хотя нам и пришлось немного подправить интегральную часть регулятора скорости. Эти испытания доказали, что у нашей структуры управления есть хороший запас живучести. По сути, мы получили полноценный цифровой двойник: теперь можно безопасно гонять станок в критических режимах, которые на реальном железе проверять просто побоялись бы из-за риска поломки. В реальном станке НФ-630 направляющие скольжения или качения обладают значительным трением. В Simulink-модель мы добавили блок нелинейного трения (Stribeck Friction), который учитывает как статическое трение (трение покоя), так и вязкое трение, зависящее от скорости. Интересным наблюдением стало то, что при очень низких скоростях подачи система склонна к возникновению автоколебаний типа «stick-slip» (скачкообразное движение). Чтобы избежать этого эффекта,

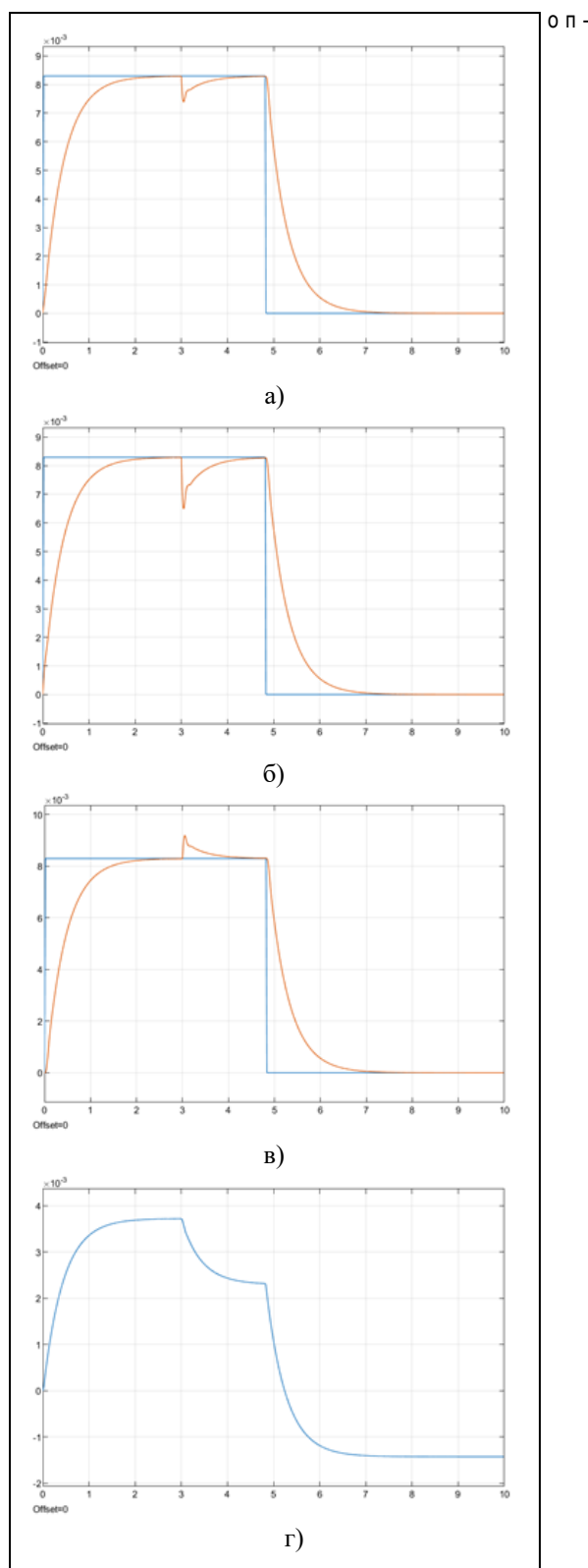


Рис. 8. Разница скоростей при внешних возмущающих воздействиях. а) 2 процента от заданных перемещений. б) 5 процентах от заданных перемещений. в) при 7 процентах заданных перемещений. г) ошибка отслеживания.

тимизировали зону нечувствительности регулятора и добавили небольшую упреждающую компенсацию по току (feed-forward control). Это позволило добиться плавности хода, которая необходима для получения чистой поверхности при фрезеровании. Моделирование также позволило оценить токовую нагрузку на обмотки двигателей. Поскольку фрезерный станок работает в продолжительных режимах, важно, чтобы среднеквадратичное значение тока не превышало номинал. Мы проанализировали циклы «разгон–установившееся движение–торможение» для различных траекторий. Было установлено, что наиболее энергозатратными являются режимы с частой сменой направления (например, при фрезеровании сложных карманов по растровой траектории). В эти моменты ток двигателя достигает пиковых значений, но благодаря ограничению в регуляторе, система не выходит из строя, сохраняя работоспособность.

Перспективы дальнейших исследований

Завершая описание текущей модели, стоит отметить, что она является идеальной базой для внедрения интеллектуальных методов управления. В частности, мы планируем интегрировать блок нейросетевого адаптивного управления. В процессе реального резания инструмент изнашивается, а твердость материала может меняться. Обычный PD-регулятор не может подстроиться под эти изменения. Адаптивный алгоритм будет в реальном времени корректировать коэффициенты усиления, основываясь на отклонении фактической траектории от программной. Это позволит не только повысить точность, но и увеличить ресурс инструмента за счет стабилизации усилий в зоне резания. Таким образом, разработанная модель — это не просто теоретический конструкт, а рабочий инструмент для проектирования систем управления ЧПУ нового поколения.

Заключение

Была собрана в Simulink/Simscape полноценная имитационная модель двухкоординатной системы. Она получилась комплексной: внутри связаны электрическая часть, механика и алгоритмы управления.

В качестве «мозга» системы выбрали дискретный PD-регулятор. Период дискретизации T_s выбрали так, чтобы модель была максимально близка к реальному цифровому контроллеру. При этом система сохраняет полную устойчивость.

Тесты показали отличную динамику: оси перемещаются в нужное положение всего за пару десятых секунды. Перерегулирования либо нет совсем, либо оно держится в пределах пары процентов — для точности это отличный результат.

Ошибка слежения ведет себя предсказуемо. Небольшой пик есть только в моменты разгона или смены направления, а в установившемся режиме она практически обнуляется. Для амплитуды наших перемещений это значение ничтожно мало.

Скорость меняется плавно, без рывков. Это подтверждает, было правильно рассчитали траектории и оси X и Y работают синхронно, не ускоряются в процессе перемещения.

Что касается токов двигателя, то основные всплески приходятся на разгон и торможение. Но даже в эти моменты ток не вылетает за допустимые границы — значит, перегрузка сервоприводов не грозит.

Система легко справляется как с линейным перемещением, так и с круговым. Благодаря согласованному управлению осями, мы получаем идеальную геометрию без искажений.

Эта модель станет базой для следующего шага: мы планируем добавить в нее адаптивное управление, чтобы имитировать реальный процесс резания на трехкоординатном фрезерном станке.

Библиографический список

1. Åström K.J., Murray R.M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. — Updated edition. — Princeton, NJ: Princeton University Press, 2022.
2. Franklin G.F., Powell J.D., Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems. — 8th ed. — Pearson, 2022.
3. Nise N.S. Control Systems Engineering. — 8th ed. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2022.
4. Bolton W. Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering. — 7th ed. — Pearson, 2023.
5. Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control. — 2nd ed. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2022.
6. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. — 4th ed. — Pearson, 2022.
- The MathWorks, Inc. Simulink User's Guide. — Natick, MA, USA, 2023.
1. The MathWorks, Inc. Simscape Electrical User's Guide. — Natick, MA, USA, 2023.