

СРЕДСТВА АВТОНАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА**В.В. Тютиков, Е.В. Красильникъянц, А.А. Алексеев (ИГЭУ им. В.И. Ленина)**

Обосновывается необходимость разработки программного инструмента для автонастройки отечественной системы управления электроприводом металлорежущих станков (СУЭП МС). Проведение анализа программного обеспечения ведущих мировых производителей систем числового программного управления (ЧПУ) позволило сформулировать требования, предъявляемые к инструменту автонастройки. На примере типовой структуры двухконтурной СУЭП МС, построенной по принципам подчиненного управления, рассматривается универсальный алгоритм автонастройки, для работы которого требуется задать лишь желаемое быстродействие (полосу пропускания) и запас устойчивости по фазе. Для этого алгоритма представляется разработанная модификация, позволяющая задавать максимальное быстродействие и получить несколько вариантов коэффициентов регулятора в зависимости от желаемой "жесткости" работы контура. Приводится интерфейс программной реализации инструмента, а также результаты его работы в виде диаграмм Боде настроенных контуров на реальном металлорежущем станке и пример отработки тестового кругового движения двумя осями.

Ключевые слова: система управления электроприводом, металлорежущий станок, автонастройка, диаграмма Боде, подчиненное регулирование координат.

Введение

Большинство современных систем управления электроприводом металлорежущих станков (СУЭП МС) построено по принципам подчиненного регулирования координат, где внутренний контур получает задание от внешнего. Одним из преимуществ подчиненного регулирования является удобство последовательной настройки контуров от внутреннего к внешнему. Число контуров в таких системах составляет 2...4 ед.; каждым из них управляет ПИД-регулятор (также может быть П, ПИ и др.), параметры которого (пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты усиления) должны быть корректно настроены. Более того, с целью улучшения быстродействия, точности и устойчивости системы управления, постоянно разрабатываются модификации регуляторов, заметно усложняющие структуру, а следовательно, и процедуру их настройки.

Настройка всех необходимых параметров может производиться в ручном или в автоматическом (автоматизированном) режимах при помощи специализированного программного обеспечения для пусконаладочных работ. В первом случае производитель СУЭП МС предоставляет пользователю средства для проведения тестовых воздействий (ступенчатых, гармонических и т.д.), а также методику, позволяющую итерационно подобрать наиболее эффективные параметры регуляторов, руководствуясь реакцией объекта управления на это воздействие. В зависимости от опыта наладчика и правильности выбора методики итоговое качество обработки заготовки может сильно меняться, а затрачиваемое на настройку время напрямую зависит от числа параметров регуляторов.

В связи с этим зарубежные производители СУЭП МС в своем программном обеспечении реализуют методы автонастройки регуляторов с учетом их модифицированных структур. Пользователю предлагается задать желаемое быстродействие, запас устойчивости и еще ряд опциональных параметров, после чего программой определяются соответствующие величины коэффициентов. Они могут быть получены как рас-

четным путем, исходя из известных данных об ЭП, так и путем подачи тестовых воздействий и автоматическом анализе реакции системы на них. Очевидными преимуществами автонастройки являются независимость от опыта наладчика и заметное уменьшение затрачиваемого на процесс настройки времени. Однако если настройку проводит эксперт, на некоторых объектах его может не удовлетворить результат автонастройки, — в таких случаях он может прибегнуть к ручной подстройке полученных коэффициентов.

Обзор ПО ведущих производителей СУЭП МС

1. Фирма Omron для настройки систем управления движением предлагает ПО Servo Analyzer (<http://www.deltatau.com>). Продукт позволяет генерировать логарифмическую амплитудно-фазовую частотную характеристику (ЛАФЧХ или диаграмму Боде) контура на основе поданного в контур сигнала, которым является белый шум или синусоидальный сигнал с нарастающей частотой. По частоте определяется передаточная функция системы путем анализа полученной диаграммы с использованием нелинейного приближения с помощью кривых. Идентификация модели проводится по частотной характеристике замкнутого контура на основе быстрого преобразования Фурье. Предусмотрена возможность построения ЛАФЧХ для замкнутого/разомкнутого контура, а также для объекта управления. По идентифицированной передаточной функции объекта управления происходит настройка коэффициентов ПИД-регулятора положения.

2. Фирма Siemens для сервопреобразователей Sinamics предлагает комплекс Siemens Starter (<https://www.siemens-ru.com>), в который входит инструмент для настройки регуляторов СУЭП. Автонастройка ПИ-регулятора скорости проводится по релейному методу [1] в зависимости от заданных значений полосы пропускания и запаса по фазе. П-регулятор положения настраивается по идентифицируемому коэффициенту инерции. Кроме того, в программе присутствует возможность автоматической настройки фильтров (низких частот и противорезонанс-

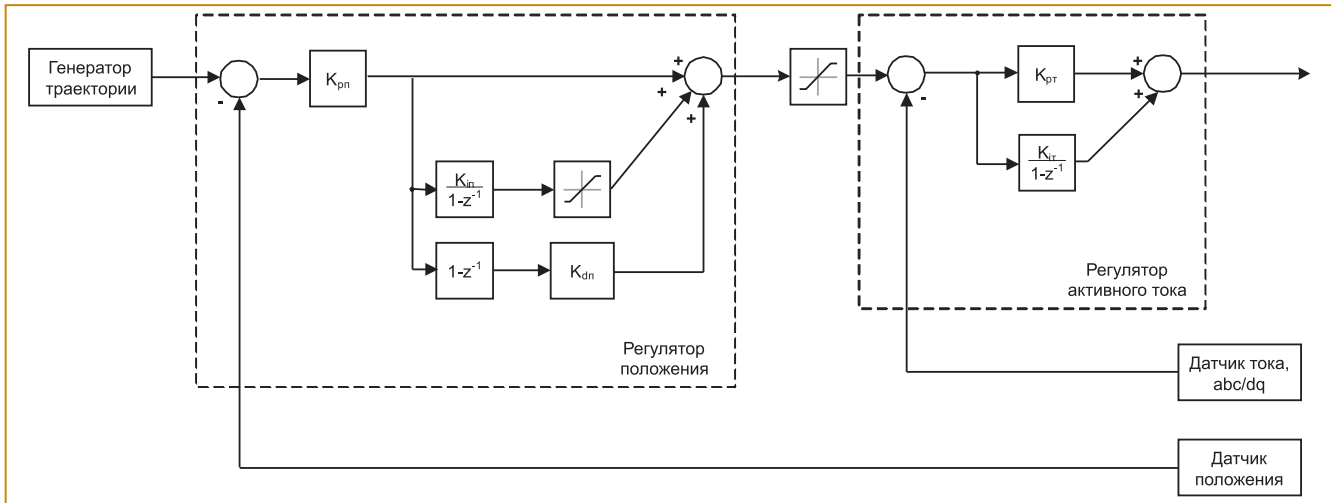


Рис. 1. Часть структуры системы управления электроприводом металлорежущего станка

ных на выходе регулятора). По окончании процесса программа показывает пользователю ряд графиков, характеризующих качество настройки системы: диаграммы Боде для замкнутого и разомкнутого контуров, объектов управления и регуляторов — расчетные и реальные графики, влияние фильтров и т. д.

3. Фирмой Fanuc для настройки своих СУЭП MC разработан комплекс Servo Guide (<https://one.fanuc.eu>). Настройка коэффициентов ПИ-регулятора скорости проходит в два этапа. Сначала проводится предварительное определение коэффициента усиления контура скорости. Измеряется частотный отклик путем подачи тестового сигнала; двигатель при этом должен находиться в движении. Для этого загружается технологическая программа (медленное движение вперед-назад). Тестовым сигналом является синусоидальный с нарастающей частотой. В результате строится диаграмма Боде для замкнутого контура, по которой определяется идеализированная передаточная функция объекта управления (то есть без учета резонансов). Происходит сравнение реального графика и идеального, после чего пропорциональный коэффициент корректируется, а противорезонансные фильтры (до 4 ед.) настраиваются аналогичным образом (чтобы скомпенсировать имеющиеся резонансы и привести итоговую диаграмму к идеальной). После этого проводится итоговая подстройка пропорционального коэффициента с учетом вырезанных резонансов для максимального расширения полосы пропускания.

4. Производитель систем управления движением Kollmorgen предлагает ПО Performance Servo Tuner (<http://webhelp.kollmorgen.com>) — программу для снятия и анализа диаграмм Боде, включающую автоматическую настройку регуляторов скорости и положения. Также в ней заложена возможность снятия диаграммы для замкнутого, разомкнутого контуров, объекта управления, регулятора и любых других двух точек контура положения, заданных пользователем. Тестовые сигналы — белый шум и синусоида с нарастающей частотой. Есть возможность симуляции ЛАФЧХ для разомкну-

го контура на основе замкнутого. Единоразово сняв диаграмму для замкнутого/разомкнутого контура, можно настраивать регулятор/фильтры вручную, пользуясь симулированной диаграммой и ее изменениями при корректировке параметров. Инструмент автонастройки требует участия пользователя для определения частоты, на которой фаза принимает значение -180 гр. (это делается визуально на основе полученной диаграммы Боде для объекта управления), а также для выбора типа настройки (ПИД-регулятор положения + фильтры, ПИД-регулятор положения без фильтров, П-регулятор положения + ПИ-регулятор скорости и др.). По окончании настройки на экран выводится ЛАФЧХ для объекта управления, а также симулированная на его основе диаграмма для замкнутого контура.

Обзор программных решений, предлагаемых производителями СЧПУ, позволил выделить следующие общие черты в функциональности инструментов автонастройки, выраженные в возможностях:

- настройки регуляторов тока и положения (скорости) разных типов (ПИ, ПИД и др.) с учетом их модификаций и цифровых фильтров;
- оценки качества настройки путем построения диаграмм Боде;
- ручной подстройки каждого регулятора.

Структура СУЭП MC

Рассмотрим типовую структуру СУЭП MC в упрощенном виде, состоящую из двух контуров управления — тока и положения (рис. 1). Заметим, что при управлении шпиндельными двигателями в этой структуре регулятор положения становится регулятором скорости. В общей сложности пользователю необходимо настроить как минимум пять параметров: пропорциональный коэффициент регулятора тока K_{pr} ; интегральный коэффициент регулятора тока K_{it} ; пропорциональный коэффициент регулятора положения K_{pr} ; интегральный коэффициент регулятора положения K_{it} ; дифференциальный коэффициент регулятора положения K_{dt} .

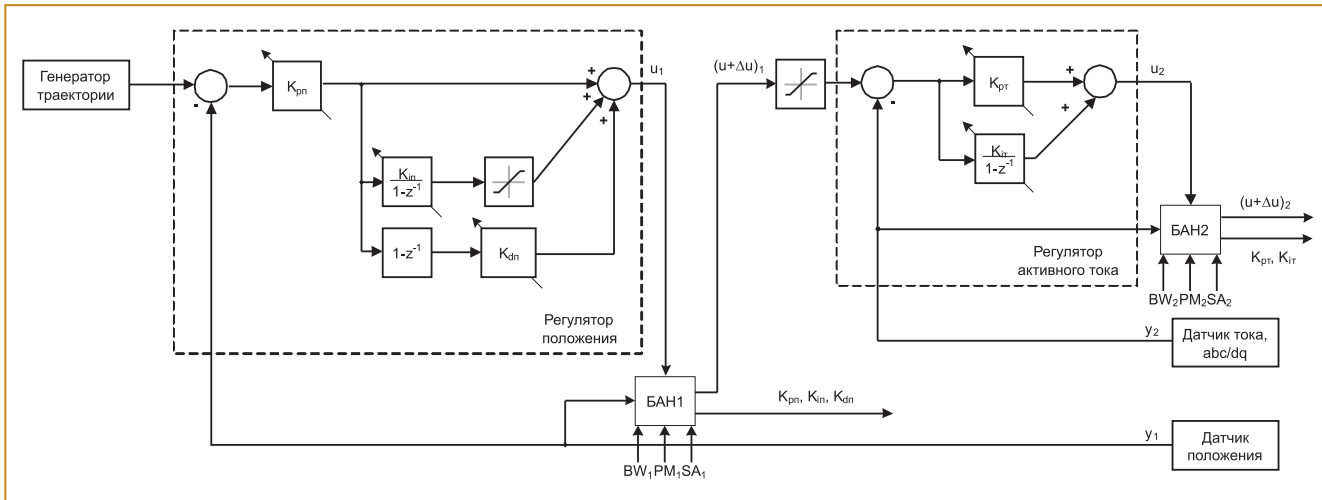


Рис. 2. Структура СУЭП МС с интегрированными блоками автонастройки: *BW* – полоса пропускания, *PM* – запас по фазе, *SA* – амплитуда синусоид. Индексом "1" обозначены сигналы и параметры, относящиеся к регулятору положения, индексом "2" – к контуру тока

Алгоритм автонастройки

Для проведения автонастройки регуляторов система управления была дополнена двумя структурно идентичными блоками автонастройки — БАН1 для настройки регулятора положения/скорости и БАН2 — для настройки регулятора тока (рис. 2). Согласно принципам подчиненного управления, сначала требуется настроить внутренний контур (тока), затем внешний (положения/скорости).

Алгоритм работы БАН1 и БАН2 основан на принципах непараметрической идентификации системы в замкнутом контуре и расчете коэффициентов регулятора в соответствии с одним из "правил" [2, 3] и имеет следующий вид.

1. Пользователь задает желаемую полосу пропускания и запас по фазе, которым должен соответствовать настроенный контур, и запускает процесс автонастройки. Амплитуда тестовых синусоидальных воздействий определяется в зависимости от номинального тока двигателя.

2. На основе заданной полосы пропускания *BW* формируется и подается на вход следующего структурного элемента тестовый сигнал $u + \Delta u$, где

$$\Delta u = SA \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{BW}{10}\right) + \sin\left(\frac{BW}{3}\right) + \\ + \sin(BW) + \sin(3BW) + \\ + \sin(10BW) \end{pmatrix} = SA \sum_{i=1}^5 \sin(\bar{\Omega}_i),$$

где *SA* — заданная амплитуда тестового сигнала, $\bar{\Omega} = [BW/10 \ BW/3 \ BW \ 3BW \ 10BW]$ — вектор базовых частот, а *u* — сигнал на выходе настраиваемого регулятора.

3. На основе сигналов *u* и *y* блок рассчитывает частотную характеристику объекта управления (ЧХ ОУ) в пяти точках, соответствующих частотам в векторе $\bar{\Omega}$. Расчет производится по рекурсивному методу наимень-

ших квадратов. Он позволяет определить параметры линейной системы в форме:

$$y(t) = \psi(t)\Theta(t),$$

где $y(t)$ — выходной сигнал системы, $\psi(t)$ — вектор регрессоров, $\Theta(t)$ — вектор определяемых параметров. В настоящем блоке используется алгоритм оценки $\Theta(t)$ на основе рекуррентной бесконечной истории с применением фактора забывания:

$$\Theta(t) = \hat{\Theta}(t-1) + K(t)(y(t) - \hat{y}(t));$$

$$\hat{y}(t) = \psi^T(t)\hat{\Theta}(t-1); K(t) = Q(t)\psi(t);$$

$$Q(t) = \frac{P(t-1)}{\lambda + \psi^T(t)P(t-1)\psi(t)};$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda} \left(P(t-1) - \frac{P(t-1)\psi(t)\psi(t)^T P(t-1)}{\lambda + \psi(t)^T P(t-1)\psi(t)} \right).$$

Здесь — фактор забывания, принимающий значения 0,98...0,995.

В качестве регрессоров используется следующий вектор:

$$\psi(t) = [A \sin\left(\frac{BW}{10}t\right) \ A \sin\left(\frac{BW}{3}t\right) \ A \sin(BWt) \ A \sin(3BWt) \dots \\ \dots A \sin(10BWt) \ A \cos\left(\frac{BW}{10}t\right) \ A \cos\left(\frac{BW}{3}t\right) \dots \\ \dots A \cos(BWt) \ A \cos(3BWt) \ A \cos(10BWt) \ 1]^T.$$

В таком случае $\Theta(t)$ на выходе блока будет сигнал в комплексной форме размерностью 5x1, где каждый элемент соответствует частотной характеристике на частоте из вектора $\bar{\Omega}$.

Для определения частотной характеристики объекта управления $G(s)$ на основе сигналов *u* и *y* сначала рассчитываются две передаточные функции:

$$H_1(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)C(s)} = \frac{y}{u + \Delta u},$$

$$H_2(s) = \frac{1}{1 + G(s)C(s)} = \frac{u}{u + \Delta u},$$

где $G(s)$ — передаточная функция регулятора, после чего характеристика ОУ вычисляется делением:

$$G(s) = \frac{H_1(s)}{H_2(s)}.$$

На основе этой характеристики и заданных параметров быстродействия и устойчивости по определенному алгоритму генерируются коэффициенты регулятора выбранного типа.

4. Определяется критический коэффициент, соответствующий системе на границе устойчивости, и на его основе в зависимости от заданной полосы пропускания и запаса по фазе рассчитываются коэффициенты выбранного типа регулятора.

5. Для оценки точности определения ЧХ ОУ и качества полученной системы вычисляются значения конвергенции (сходимости) и ожидаемого запаса по фазе.

Сходимость вычисляется следующим образом:

$$C = 100 - \begin{cases} a, a < 100 \\ 100, a \geq 100 \end{cases},$$

где C — сходимость, %; a — коэффициент сходимости, определяемый как

$$a = \frac{|R_n| - |R_{n-1}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |R_i|},$$

где R — ЧХ на частоте, равной заданной полосе пропускания, N — размер буфера истории, принят равным 64.

Оценочный запас устойчивости по фазе, которого можно добиться с полученными коэффициентами регулятора, рассчитывается как

$$\widehat{PM} = \left(\left(\operatorname{atan2} \left(\frac{\operatorname{Im}(R)}{\operatorname{Re}(R)} \right) \right) \bmod(360) \right) - 180.$$

Автоподбор полосы пропускания

Рассмотренный блок позволяет получить коэффициенты регулятора, задавшись полосой пропускания и запасом по фазе. Однако если последний параметр для большинства объектов имеет смысл держать на уровне 50–60 градусов, то полоса пропускания может зависеть от различных факторов (частота ШИМ, частота расчета задания на ток [4], дискретность датчиков обратной связи, нелинейности типа ограничение и зона нечувствительности в структурах регуляторов и др.). Опытный наладчик может иметь представление о величине полосы пропускания каждого контура, однако даже он в отдельных случаях не способен выбрать ее наиболее рационально. В свя-

зи с этим был разработан алгоритм автоподбора полосы пропускания.

Принцип работы алгоритма.

1. Задается необходимый запас устойчивости по фазе РМ (60 гр. для обоих контуров), максимальная полоса пропускания BW_{max} (1000 и 100 Гц для контура тока и положения соответственно), начальное время теста T_0 (100 и 1000 мс соответственно) и амплитуда тестового сигнала (около 10% от максимального задания на ШИМ для контура тока — точное значение может быть определено автоматически из условия, что при нем ток в фазе двигателя не превышает половины номинала; в случае контура положения амплитуда принимается как 10% от ограничения выхода регулятора). В соответствующий контур в течении времени $T = T_0$ подается сигнал $u + \Delta u$, сформированный для $BW = BW_{max}$.

2. Оценивается сходимость ЧХ ОУ — если она ниже 98%, то тест повторяется снова, но время T увеличивается на $0,1T_0$.

3. Проверяется оценка запас устойчивости по условию $\widehat{PM} > PM$, если сходимость выше 98%.

4. Происходит повторный запуск теста при невыполнении условия п. 3, при этом желаемая полоса пропускания уменьшается на $0,1BW_{max}$.

5. Проверяется наличие трех флагов, отвечающих за "жесткость" рассчитанных коэффициентов при выполнении условия п. 3. Флаги выставляются следующим образом:

5.1. Происходит возврат в п. 4, если величина рассчитанного пропорционального коэффициента K_p выше порогового значения $TS1$.

5.2. Сохраняется набор коэффициентов как "жесткий", $K_p > TS2$ если, и выставляется флаг 1, после чего происходит возврат в п. 4.

5.3. Сохраняется набор коэффициентов как "оптимальный", если $K_p > TS3$, и выставляется флаг 2, после чего происходит возврат в п. 4.

5.4. Сохраняется набор коэффициентов как "мягкий", если $K_p > 0$, и выставляется флаг 3.

Пороговые значения пропорционального коэффициента для контура тока определяются по формулам:

$$TS1 = 2 \frac{MaxPwm}{I_n K_{ADC}}; TS2 = \frac{MaxPwm}{I_n K_{ADC}}; TS3 = 0,5 \frac{MaxPwm}{I_n K_{ADC}},$$

где $MaxPwm$ — максимальное задание на ШИМ, I_n — номинальный ток двигателя, K_{ADC} — коэффициент датчика обратной связи по току. Для контура положения пороги выбираются схожим образом на основе величины ограничений выходного сигнала регулятора и величины ошибки слежения, поступающей на регулятор.

6. Заканчивается выполнение алгоритма при невыполнении условия 5.4, при наличии трех флагов или при достижении $BW = 0,1BW_{max}$, после чего пользователю предлагается выбор одного из полученных наборов.

Программная реализация

На основе рассмотренного алгоритма, а также его модификации, для автонастройки приведенной на рис. 1 системы управления был разработан инструмент «Настройка регуляторов», входящий в пусконаладочный комплекс для СЧПУ IntNC PRO [5] ServoIDE. Часть его интерфейса изображена на рис. 3. Для запуска процедуры автонастройки соответствующего контура пользователю достаточно нажать на кнопку «Старт», не меняя параметров по умолчанию. При выделении пункта «Эксперт» появляется возможность редактирования скрытых параметров, таких как минимально необходимая величина сходимости, ручное задание амплитуды тестового сигнала и т. п.

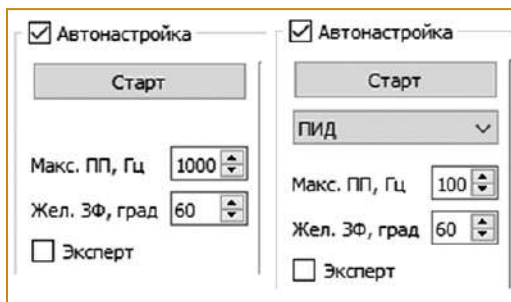


Рис. 3. Интерфейс программы автонастройки: регулятор тока (слева) и положения (справа)

Таблица 1. Данные двигателей станка ИС630

Двигатель	Тип	Назначение	Номинальный момент, Нм	Номинальная скорость, об/мин
ДВУ2М215L	СДПМ	Ось X, Y, Z	61	500
ДВУ2М165L	СДПМ	Ось В	13	1000
ДВУ2М165S	СДПМ	Смена инструмента	7	1000
ДВУ2М165M	СДПМ	Смена палет	10	1000
Bosch Rexroth 1MB270	АД	Шпиндель	190	1500

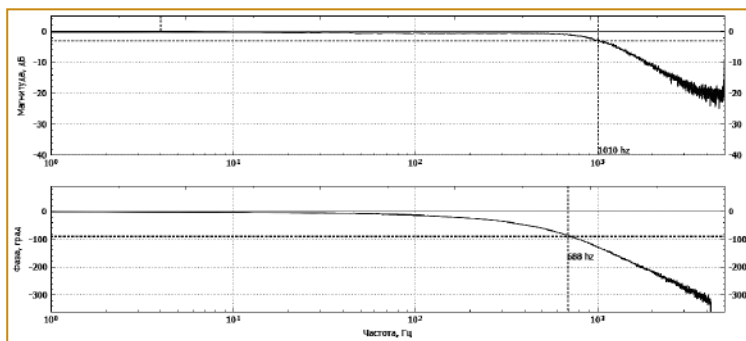


Рис. 4. ЛАФЧХ настроенного контура тока оси X

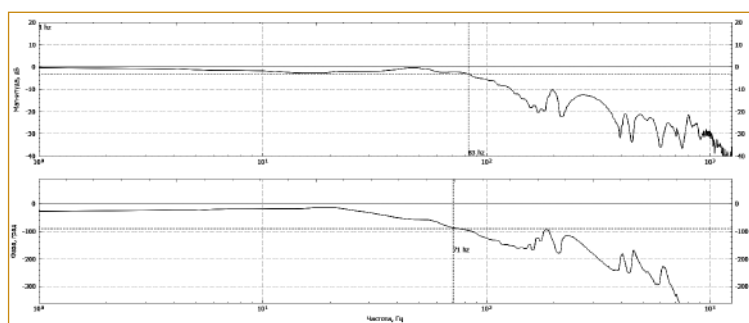


Рис. 5. ЛАФЧХ настроенного контура положения оси Y

После получения всех возможных наборов коэффициентов пользователю предлагается запустить тесты (ступенчатый и Боде) для оценки качества переходного процесса и полосы пропускания, после чего применить и сохранить коэффициенты подходящего набора.

Для случаев, когда алгоритм не сможет подобрать коэффициенты, или итоговое качество работы

не удовлетворит наладчика, в инструмент встроен ряд тестовых воздействий для каждого этапа с описанием методики ручной настройки всех параметров.

Результаты практического применения

С использованием разработанного инструмента была проведена настройка регуляторов СУЭП фрезерного обрабатывающего центра ИС630, включающего в себя три осевых двигателя, вращающийся стол, смену инструмента, смену палет и шпиндель. Данные на эти двигатели приведены в табл. 1.

В качестве результатов приведем диаграммы Боде настроенных контуров тока и положения разных дви-

гателей (рис. 4, 5), а также результат отработки двигателями осей X и Z кругового задания (рис. 6).

Для регуляторов тока всех двигателей выбирался «жесткий» набор коэффициентов, что позволило добиться полосы пропускания в соответствующем контуре не менее 600 Гц. Для регуляторов скорости шпиндельного двигателя выбрался «мягкий» набор с полосой пропускания контура 20 Гц, для регуляторов положения остальных двигателей — «оптимальный» набор с результирующими полосами пропускания от 25 до 80 Гц.

Круговой тест показывает уровень отклонения при обработке двумя двигателями кругового контура и является интегральной оценкой качества настройки СУЭП МС. При заданных условиях (радиус 5 см, скорость

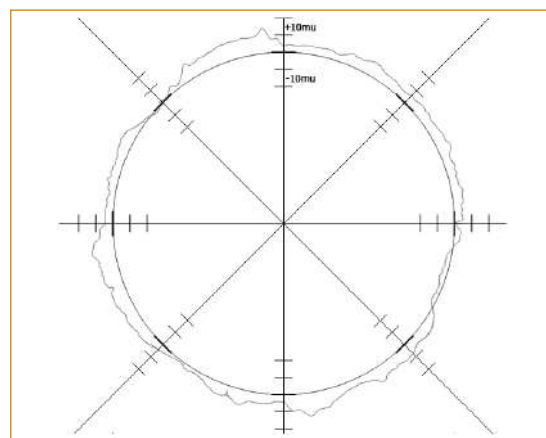


Рис. 6. Отработка кругового задания осями X и Z

Сделав первый шаг, вы показываете, что готовы действовать. Делайте крохотные шаги - они помогут нащупать верную дорогу.

Вишен Лакьяни

6 м/мин) максимальное отклонение по от траектории составило 14 мкм.

Заключение

Разработанный набор инструментов для проведения автонастройки СУЭП МС позволяет довольно быстро получить коэффициенты регуляторов тока и положения, и в общем случае не требует от пользователя специальных знаний — необходимо лишь выбрать желаемую "жесткость" конкретного контура. Работоспособность инструментов была проверена при пусконаладке фрезерного обрабатывающего центра ИС630. Таким образом, процесс пусконаладки

станков под управлением СЧПУ IntNC PRO значительно сокращается, а качество обработки заготовки в меньшей степени зависит от опыта наладчика.

Список литературы

1. *Chidambaram, M.* Relay Autotuning for Identification and Control. / Chidambaram, M., Sathe, V. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. — 287 p.
2. *McCormack A.S.* Rule-based autotuning based on frequency domain identification / McCormack A.S., Godfrey K.R. // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 1998. № 1 (6). — P. 43-61.
3. *Woodyatt A.R.* Auto-tuning PID controller design using frequency domain approximation / Woodyatt A.R., Middleton R.H. // European Control Conference (ECC). — 1997. — P. 1049-1054.
4. *Klarenbach C.* Design of Fast and Robust Current Controllers for Servo Drives based on Space Vector Modulation / Klarenbach C. et al // PCIM 2011. — 2011. — P. 182-188.
5. *Бурков А.П.* Современный асинхронный электропривод для станков с ЧПУ / Бурков А.П. и др. // Автоматизация в промышленности. — 2012. — № 5. — С. 25 -30.

*Тютиков Владимир Валентинович — д-р техн. наук, проф.,
Красильникьянц Евгений Валерьевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
Алексеев Александр Александрович — аспирант
ИГЭУ им. В.И. Ленина.*

E-mail: tvv@ispu.ru, krev58@gmail.com, alsansan420@gmail.com

Управлять эксплуатацией самого мощного в мире ледокола будут с помощью TRIM

Компания НПП «СпецТек» поставила систему обеспечения эксплуатацией головного ледокола проекта 22220 «Арктика». Система создана на основе программного комплекса TRIM, ее непосредственным заказчиком выступил Концерн «НПО «Аврора».

Головной универсальный атомный ледокол «Арктика» проекта 22220 построен по заказу корпорации «Росатом» на «Балтийском заводе» в Санкт-Петербурге. В отличие от действующих ледоколов, он может обеспечивать проводку судов как на глубоководных трассах Северного морского пути, так и на мелководье благодаря способности менять осадку. Атомные ледоколы проекта 22220 смогут проводить караваны судов, пробивая лед толщиной до 3 метров.

Одной из важнейших задач эксплуатации ледокола является проведение работ общесудового и специального назначения по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР). Большой объем этих работ, а также их сложность и необходимость точного соблюдения регламентов и требований повышают трудоемкость процессов технического менеджмента. Экономическая эффективность эксплуатации зависит от затрат как на сами работы, так и на закупку широкой номенклатуры запчастей и материалов. Статьи этих затрат требуют корректного учета и объективного анализа с целью выявления внеплановых составляющих и их причин, и принятия соответствующих решений.

В этой связи необходимым инструментом управления эксплуатацией станет система обеспечения эксплуатации ледокола (СЭЛ). Она служит для информационной поддержки и автоматизации процессов ТОиР, включает береговую и судовую части.

Функциональность СЭЛ охватывает планирование ТОиР, составление, калькуляцию и согласование ремонтных ведомостей, автоматизированный обмен ремонтными ведомостями между офисом и судном, формирование отчетов о выполнении работ, определение плановых и фактических затрат на ТОиР, анализ результатов ТОиР, формирование заявок на материально-технические ресурсы под ремонтные работы, управление складами запчастей и материалов, автоматизированное взаимодействие со смежными информационными системами и многие другие функции.

В ходе создания СЭЛ специалисты НПП «СпецТек» выполнили весь комплекс работ, включая разработку документации на систему, наполнение базы данных СЭЛ, разработку конвертера для интеграции СЭЛ с АСУТП ледокола, установку, пуско-наладочные работы и приемочные испытания СЭЛ, подготовку пользователей, швартовые и ходовые испытания системы на производственной базе ООО «Балтийский завод-Судостроение».

[Http://www.trim.ru](http://www.trim.ru)