(19) Евразийское патентное ведомство

(11) 042141 (13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.01.19

(21) Номер заявки
202000306

(22) Дата подачи заявки
2020.09.14

(51) Int. Cl. *B23Q 15/00* (2006.01)
B23Q 15/12 (2006.01)

(54) УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ МНОГОКООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ СТАНКА С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

(43) **2022.03.31**
(96) **2020/EA/0059 (BY) 2020.09.14**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ "ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ"; ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "ПЛАНАР" (BY)

(72) Изобретатель:
Басинюк Владимир Леонидович, Ковенский Алексей Евгеньевич, Чикун Юрий Николаевич, Еловой Олег Михайлович, Школык Святослав Борисович, Миланович Марина Михайловна (BY)

(56) RU-C2-2312749
RU-C2-2399475
RU-C2-2256543
EtherCAT application manual [онлайн], Elmo Motion Control 2016 [найдено 2021.04.24], найдено в <https://avi-solutions.com/upload/iblock/91f/EtherCAT%20Application%20Manual.pdf>
MSD Servo drive user manual, Single axis system multi axis system compact [онлайн], Moog 2015 [найдено 2021.04.24], найдено в <https://www.moog.com/literature/ICD/Moog-ServoDrives-MSD_CANopen_EtherCAT-Manual-en.pdf>
Omative adaptive and vibration control & monitoring (AVCM) system, Installation manual for software-plus-hardware configuration [онлайн], Siemens 2018-2019 [найдено 2021-04-25], найдено в <https://cache.industry.siemens.com/dl/files/084/109772084/att_999924/vl/AVCM_-_Installation_Manual_ISAV_EN20190905.pdf>

(57) Изобретение относится к области машиностроения и может быть использовано для управления параметрами функционирования прецизионных многокоординатных систем с числовым программным обеспечением. Решение поставленной задачи достигается тем, что в двухуровневом универсальном аппаратно-программном комплексе в верхний уровень с модулем управления и контроля 1 введен блок баз данных 2, а в модуль управления и контроля нижнего уровня 3 введены блоки сопряжения 4 и 5 с измерителями соответственно 10.1, 10.2...10.k потребляемой приводами 6.1, 6.2...6.k мощности и 12.1, 12.2...12.k колебаний исполнительных органов 11.1, 11.2...11.k, при этом команда, управляющая контроллерами 9.1, 9.2...9.k электродвигателей 7.1, 7.2...7.k, формируется с учетом содержащейся в блоке 2 информации о задержках по времени выполнения команд, частотах собственных механических колебаний и динамических свойствах управляемых приводов 6.1, 6.2...6.k, данных энкодеров 8.1, 8.2...8.k и измерителей 10.1, 10.2...10.k и 12.1, 12.2...12.k, что позволяет существенно повысить плавность работы исполнительного органа за счет снижения на порядок и более амплитуд его механических колебаний с собственной частотой и расширить возможности адаптивного управления процессами координатных перемещений исполнительных органов при гашении этих колебаний.

042141 B1

042141 B1

Изобретение относится к области машиностроения и может быть использовано для управления параметрами функционирования прецизионных многокоординатных систем станка или группы станков с числовым программным обеспечением (ЧПУ) с поддержкой интерфейса пользователя и обратной связью в реальном времени, в которых посредством прецизионных механизмов с приводами, имеющими различные типы электродвигателей, осуществляется позиционирование и перемещение рабочих органов в 3-6 координатной системе в определенный момент времени в требуемую точку пространства.

В настоящее время для управления станков с ЧПУ в роботизированных производствах используются, как правило, двухуровневые универсальные аппаратно-программные комплексы (УАПК), сформированные по принципу единого центрального специализированного блока управления верхнего уровня, осуществляющего контроль и управление координатным положением и перемещениями рабочих органов станка посредством исполнительных модулей второго уровня, непосредственно связанных с рабочими органами. В них управление приводами может осуществляться либо непосредственно на верхнем уровне, либо на верхнем уровне формируются команды для контроллеров приводов нижнего уровня, а последние в соответствие с этими командами осуществляют управление приводами.

При управлении приводами непосредственно на верхнем уровне используется библиотека алгоритмов управления, обеспечивающих формирование электрических сигналов для наиболее рационального функционирования приводов при заданном скоростном и нагрузочном режиме. Вместе с тем даже в 3-6 координатном прецизионном станке могут использоваться электродвигатели различных типов, связанные с исполнительными органами механической системой, имеющей существенно отличные инерционно-жесткостные характеристики. Поэтому с учетом, как правило, относительно небольшого объема выпуска таких станков использование этого подхода в значительном числе случаев не вполне экономически и технически обосновано.

При формировании на верхнем уровне команд для контроллеров приводов типа "контроллер-электродвигатель" нижнего уровня наиболее рациональные алгоритмы выполнения данных команд уже заложены производителями приводов в программное обеспечение контроллеров. Поэтому в значительном числе случаев использование этого подхода оказывается экономически и технически обоснованно. Однако к ее основному недостатку можно отнести ограниченные возможности оперативного адаптивного управления координатными и скоростными режимами перемещения исполнительных органов, к достаточно характерным особенностям которых можно отнести механические колебания с собственными частотами, возникающие при переходных процессах.

И в первом, и во втором случаях могут использоваться дополнительные системы контроля линейного и углового координатного положения исполнительных органов с обратной связью, позволяющие обеспечить их адаптивное управление. Однако эти системы контроля существенно удорожают и усложняют стоимость аппаратно-программных комплексов. Кроме того, их использование при высоких скоростях перемещения рабочих органов не всегда позволяет эффективно решать задачи обеспечения прецизионной точности и высокого качества обработки. Это связано с возникновением механических колебаний с собственными частотами при переходных процессах, варьированием в широком диапазоне динамических свойств механических систем, размещенных между электродвигателем и исполнительным органом, наличием у исполнительного органа инерционной массы и связанных со всем этим неизбежных задержках между изменением скорости вращения (перемещения) ротора электродвигателя и соответствующим этому изменению скорости вращения (перемещения) исполнительного органа.

Известен комплекс программно-аппаратных средств автоматизации управления технологическими процессами [1], в котором для расширения функциональных возможностей, повышения надежности и улучшения ремонтопригодности рабочие станции и серверы на базе персональных электронных вычислительных машин (ПЭВМ), а также контроллеры и функциональные модули объединены через локальную сеть Ethernet и содержат встроенные в каждый модуль функциональные программируемые логические интегральные схемы, которые поддерживают "зашивку" практически любых алгоритмов обработки сигналов и управления приводами, при этом конструктивное исполнение комплекса позволяет использовать на своей базе три варианта построения систем управления, включая централизованное управление, локальное управление и распределенное управление, причем во всех трех вариантах управления модуль центрального процессора выполняет начальное конфигурирование функциональных модулей, обмен информацией, контроль и диагностику программных и аппаратных средств.

Недостатком данного комплекса программно-аппаратных средств являются ограниченные возможности повышения плавности движения исполнительного органа и связанного с этим повышения качества обработки за счет снижения собственных механических колебаний в прецизионных станках с ЧПУ и нескольких однотипных или разнообразных объединенных в единую роботизированную линию прецизионных станках с ЧПУ, имеющих несколько работающих при высоких скоростях подач с переменными режимами функционирования приводов различного типа, обеспечивающих прецизионные 1...6-ти координатные перемещения исполнительных органов. При этом, как правило, возникают механические колебания с собственными частотами. Кроме того, у многоприводных станков с ЧПУ приводы могут иметь существенно отличные друг от друга динамические свойства. Каждый исполнительный орган может иметь собственную инерционную массу, в связи с чем неизбежно возникают "задержки" по времени ме-

жду изменением скорости вращения (движения) ротора электродвигателя его привода и соответствующим этому изменением скорости вращения (перемещения) исполнительного органа, существенно усложняющие возможности адаптивного управления прецизионных перемещений.

Известен аппаратно-программный комплекс для управления технологическим оборудованием с ЧПУ [2], содержащий системы управления и коммутаций, промышленный компьютер с установленным ядром системы управления с модулем синхронизации, по меньшей мере, один мобильный компьютер с установленной виртуальной панелью, персональный компьютер с установленной виртуальной панелью, сетевой маршрутизатор, при этом станочная панель подключена напрямую к промышленному компьютеру с возможностью обработки и передачи данных на модуль синхронизации, кроме того, мобильный и персональный компьютеры подключены к промышленному компьютеру системы управления.

К основному недостатку данного технического решения можно отнести ограниченные возможности повышения плавности рабочих перемещений исполнительных органов, работающих с переменными скоростями рабочих подач, вследствие возникновения собственных механических колебаний в особенности в прецизионных многокоординатных станках с ЧПУ, имеющих несколько одновременно работающих с переменными высокими рабочими подачами приводов различного типа, в которых при переходных процессах неизбежно возникают механические колебания с собственными частотами и задержки во времени между перемещением ротора электродвигателя и соответствующими этому перемещениями исполнительного органа.

Из известных к наиболее близкому по технической сущности к предлагаемому техническому решению можно отнести выбранный в качестве прототипа УАПК для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с ЧПУ [3], который имеет двухуровневую архитектуру, связанную системой коммуникации, верхний уровень которой выполнен в виде модуля управления и контроля на платформе компьютера, а нижний уровень - в виде модуля управления и контроля, сформирован из группы приводов, связанных с соответствующими им исполнительными органами.

К основному недостатку данного УАПК для адаптивного управления многоприводных прецизионных станков с ЧПУ, преимущественно в точном электронном машиностроении с допустимыми погрешностями обработки менее 4 мкм, можно отнести ограниченные возможности повышения плавности движения рабочих органов и связанного с этим качества обработки за счет снижения собственных механических колебаний при прецизионных координатных перемещениях с высокими скоростями подач и переменными режимами функционирования, обеспечиваемыми приводами различного типа, и ограниченные возможности адаптивного управления процессами координатных перемещений исполнительных органов из-за задержек во времени между изменением скорости вращением (перемещением) ротора электродвигателя и соответствующими этому изменению скорости вращения (перемещения) исполнительного органа.

Задачей изобретения является повышение плавности движения испонительных органов станков с ЧПУ и связанного с этим качества обработки за счет снижения собственных механических колебаний при прецизионных координатных перемещениях с высокими скоростями подач и расширение возможностей адаптивного управления процессами координатных перемещений исполнительных органов за счет учета задержек во времени между изменением скорости вращения (перемещения) ротора электродвигателя привода и соответствующим изменением скорости вращения (перемещения) исполнительного органа.

Решение поставленной задачи достигается тем, что в УАПК для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с ЧПУ, имеющем двухуровневую архитектуру, связанную системой коммуникации, верхний уровень которой выполнен в виде модуля управления и контроля на платформе компьютера, а нижний уровень в виде модуля управления и контроля сформирован из группы приводов, связанных с соответствующими им исполнительными органами, согласно техническому решению каждый из приводов, состоящий из электродвигателя с установленным на его роторе энкодером, связанным с контроллером, управляющим параметрами функционирования привода, снабжен измерителем потребляемой приводом мощности и измерителем параметров колебаний исполнительного органа в направлении его движения, при этом модуль управления и контроля верхнего уровня выполнен с блоком баз данных о задержках во времени между изменением скорости вращения (перемещения) ротора электродвигателя привода и соответствующим изменением скорости вращения (перемещения) связанного с ним исполнительного органа, о частотах собственных механических колебаний исполнительного органа и о динамических свойствах связанного с ним привода, причем модуль управления и контроля нижнего уровня снабжен связанными с модулем управления и контроля верхнего уровня блоком сопряжения с контроллерами управления параметрами функционирования приводов и блоком сопряжения с измерителями потребляемой приводами мощности, измерителями параметров колебаний исполнительного органа и энкодерами, при этом каждый контроллер в блоке сопряжения имеет свою область памяти (стек - Object Dictionary) для полнодуплексной связи с модулем управления и контроля верхнего уровня посредством промышленных протоколов, а каждый из измерителей потребляемой приводами мощности, измерителей параметров колебаний исполнительных органов и энкодеров имеет свою область памяти в блоке сопряжения (стек - Object Dictionary), обеспечивающую возможность передачи диагностической инфор-

мации в модуль управления и контроля верхнего уровня.

УАПК для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с ЧПУ в частных случаях исполнения может иметь

систему коммуникаций, которая выполнена с возможностью передачи данных со скоростью не менее 100 Мбит/с и возможностью обеспечения времени отклика системы управления до 1 мкс с использованием сети EtherCAT по схеме клиент-сервер в протоколе CoE, имеющем словарь объектов (object dictionary, OD) со стандартизованным описанием управляемого привода, имеющим одинаковую структуру для всех типов приводов для обеспечения возможности доступа через шину EtherCAT ко всем данным верхнего уровня управления и контроля, параметрам и функциям привода с использованием логической системы адресации (index, subindex);

средство диспетчеризации в протоколе CoE, выполненное в виде службы управления сетью NMT (network management) и установлено с возможностью предоставления соответствующих протоколов для решения задач управления коммуникационным состоянием узлов связи с управляемыми модулями контроля и управления (МУК) приводами и их мониторинга;

средство диспетчеризации в протоколе CoE, установленное с возможностью отображения коммуникационного состояния сетевого узла в диаграмме состояния (state diagram) путем отправки специальных сообщений (NMT messages);

мастер управления сети (network management master), установленный с возможностью управления коммуникационным состоянием подчиненных узлов (network management slaves) сети EtherCAT и возможностью одной командой поменять состояние всех узлов или отдельного конкретного узла;

модуль управления и контроля верхнего уровня, установленный с возможностью управления типом и содержанием сессий, т.е. транзакций, выполнения обмена информационными потоками двумя базовыми способами передачи данных по протоколу CoE: для конфигурации коммуникационной среды - SDO и для обеспечения эффективной передачи данных по принципу генератор-потребитель (producer-consumer) - PDO, причем

а) программный модуль протокола CoE, установленный с возможностью диагностики и постоянного мониторинга всех приводов с использованием сети EtherCAT;

б) средства обеспечения работоспособности узлов сети с использованием протокола CoE для циклического опроса состояния каждого привода, имеющего повышенный приоритет (NMT-Master), а также автоматической передачи специального контрольного сообщения узлами сети в модуле управления и контроля верхнего уровня;

средства визуализации человеко-машинного интерфейса (HMI).

Решение задачи повышения плавности движения исполнительных органов станков с ЧПУ и расширения возможностей адаптивного управления процессами координатных перемещений исполнительных органов достигается в результате следующего:

установка блоков контроля колебаний на исполнительном органе позволяет в автоматизированном режиме тестирования при наладке оперативно вне зависимости от используемого в нем электродвигателя, управляющего контроллера, конструктивных особенностей исполнительного органа и связывающей его с электродвигателем механической системы определить для каждого управляемого привода и зарегистрировать для дальнейшего использования в блоке баз данных (ББД) МУК верхнего уровня параметры, необходимые для эффективного адаптивного управления координатными перемещениями приводов, включая

а) частоты собственных колебаний каждого из исполнительных органов вне зависимости от типа электродвигателя и конструктивных особенностей механической системы, связывающей исполнительные органы с электродвигателем, причем эти частоты могут уточняться в автоматизированном режиме в связи с варьированием массы установленного или связанного с исполнительным органом объекта и изменением по мере эксплуатации жесткостных параметров механической системы;

б) амплитуды собственных колебаний исполнительного органа при его разгоне до, как правило, варьирующих в достаточно широком диапазоне значений скоростей рабочих подач, величины которых определяются не только типом "зашитого" в программном обеспечении управляющего электродвигателем контроллера алгоритме его разгона с учетом сопротивления движению (вращению), но и инерционно-жесткостными свойствами механической системы, связывающей электродвигатель с исполнительным органом;

в) временные задержки между началами движения (вращения) ротора электродвигателя и исполнительного органа;

установка блоков контроля мощности (БКМ), потребляемой приводом, позволяет в автоматизированном режиме тестирования при наладке оперативно определить для каждого управляемого привода вне зависимости от используемого в нем электродвигателя, управляющего контроллера, конструктивных особенностей исполнительного органа и связывающей его с электродвигателем механической системы и зарегистрировать для дальнейшего использования в ББД МУК верхнего уровня динамические качества (предельно возможный градиент увеличения тягового усилия и скорости исполнительного органа), необходимые для эффективного адаптивного управления координатными перемещениями приводов при ак-

тивном гашении механических колебаний с собственными частотами при переходных процессах функционирования исполнительных органов;

введенная в состав УАПК для адаптивного управления прецизионным оборудованием с ЧПУ дополнительная связь жестко связанных с роторами электродвигателей энкодеров (в ряде конструктивных исполнений контроллеров эта дополнительная связь может быть реализована непосредственно через выход контроллера, в который диагностическая информация поступает с энкодера), используемых для управления параметрами их функционирования, с МУК позволяет решить две задачи:

а) определить приведенные выше динамические качества приводов (предельно возможный градиент увеличения тягового усилия и скорости исполнительного органа), связав скорость перемещения ротора с потребляемой электродвигателем мощностью, что во многом определяет возможный уровень снижения амплитуды собственных колебаний исполнительного органа;

б) определить действительное координатное положение исполнительного органа с учетом его механических колебаний.

В предлагаемом техническом решении УАПК система коммуникации, построенная в виде сервера, выполнена на базе промышленного протокола реального времени EtherCAT на физическом уровне с использованием протокола высокого уровня CoE (CANopen over EtherCAT), осуществляющего обмен данными между приводами различных типов сети EtherCAT, причем эти приводы могут быть от разных производителей, что гарантирует взаимозаменяемость устройств.

Обмен данными в сети EtherCAT в протоколе CoE происходит по схеме клиент-сервер. Одним из самых важных свойств CoE является стандартизованное описание устройств (описание их функций), которое называется словарем объектов (object dictionary, OD). Это таблица, имеющая одинаковую структуру для всех типов устройств. Таким образом, это дает возможность МУК получить доступ снаружи (т.е. через шину EtherCAT) ко всем важным данным, параметрам и функциям приводов с использованием логической системы адресации (index, subindex).

Каждый элемент словаря (объект) адресуется через 16-битный индекс и 8-битный sub-индекс. В объектах записана информация об узле сети EtherCAT: какие данные узел принимает или передает, каким способом, текущее состояние узла.

В дополнение к стандартизованному описанию коммуникационных свойств устройств в соответствии с CiA 402, CoE определяет так называемые профили устройств (device profiles) для типичных устройств различных областей применения. Они указывают наиболее важные параметры, данные и функции на каждый тип устройства (например, модули ввода/вывода, приводы, энкодеры и т.д.).

Средство диспетчеризации в протоколе CoE реализовано в виде службы управления сетью NMT (network management), которая предоставляет соответствующие протоколы для решения этих задач, а именно управление коммуникационным состоянием узлов сети и мониторинг узла. При этом CoE описывает коммуникационное состояние сетевого узла в диаграмме состояния (state diagram). Путем отправки специальных сообщений (NMT messages), мастер управления сети (network management master) может управлять коммуникационным состоянием подчиненных узлов (network management slaves) сети EtherCAT. Например, мастер может одной командой поменять состояние всех узлов или отдельного конкретного узла.

Программный модуль, обеспечивающий управление типом и содержанием сессий, т.е. транзакций, выполняет обмен информационными потоками двумя базовыми способами передачи данных по протоколу CoE: SDO и PDO. При этом способ service data objects (SDO), основанный на обмене по принципу client-сервер, позволяет использовать прямую адресацию объекта по индексу и sub-индексу (index и subindex). Он используется для конфигурации устройства, передачи больших блоков данных в обоих направлениях (upload, download), но требует дополнительной нагрузки на протокол. Поэтому SDO медленный (по сравнению с PDO) способ передачи данных. Соединение по принципу SDO осуществляется как точка-точка с задействованием элементов словаря и подразумевает парный обмен пакетами с наличием подтверждения получения информации. Некоторую аналогию SDO можно провести с протоколом TCP, общий принцип тот же. С помощью SDO можно передавать произвольный объем данных.

Способ process data objects (PDO) предоставляет эффективную передачу данных по принципу генератор-потребитель (producer-consumer). Длина пакета данных ограничена 8 байтами, однако это не накладывает излишней нагрузки на протокол, как при обмене по принципу SDO. Один PDO может содержать значения более чем одной записи из словаря объектов (OD), но содержимое PDO должно быть определено на этапе инициализации. Каждое устройство может указать до 512 объектов PDO для приема и передачи с учетом ограничений системы (по памяти, вычислительной мощности) или сети (количество доступных идентификаторов EtherCAT). Программный модуль протокола CoE обеспечивает диагностику и постоянный мониторинг всех устройств сети EtherCAT.

Для обеспечения работоспособности узлов сети протокол CANopen предоставляет две взаимоисключающие альтернативы:

циклический опрос состояния узла со стороны узла с повышенным приоритетом, так называемого "NMT-Master", реализуемого по принципу "node guarding" ("защита узла");

автоматическую передачу специального контрольного сообщения узлами сети ""heartbeat" ("серд-

цебиение").

В программном модуле, обеспечивающем визуализацию человекомашинного интерфейса (HMI), используется анимированные графические обозначения, что позволяет обеспечить наглядный и удобный доступ к управлению параметрами оборудования и просмотру производственных данных.

Каждый блок нижнего уровня реализован подобно общей архитектуре системы ЧПУ и с подобными же функциями, т.е. в виде архитектурных компонент управления, привязанных к локальной коммуникационной среде на базе локального сервера с локальным менеджером уведомлений и разделяемой памятью, средства диспетчеризации и управления локальной сетью.

В совокупности это позволяет путем формирования модулем МУК верхнего уровня в противофазе собственным механическим колебаниям исполнительного органа колебаний тягового усилия электродвигателя с учетом частоты и фазы собственных колебаний, их амплитуды, задержки времени между изменением скорости вращения (перемещения) ротора электродвигателя привода и изменением скорости вращения (перемещения) исполнительного органа, а также динамических качеств привода обеспечить эффективное снижение или полное гашение собственных механических колебаний и за счет этого повысить плавность его работы и связанное с плавностью работы качество обработки при сокращении сколов и трещин, например, на режущем алмазном диске толщиной 20-50 мкм и(или) полупроводниковой пластине при ее разделении на кристаллы.

Пример УАПК для адаптивного управления прецизионным оборудованием с ЧПУ, предлагаемого в изобретении, поясняется чертежами, где в схематично упрощенном виде показаны

на фиг. 1 - схема УАПК для адаптивного управления прецизионным оборудованием с ЧПУ;

на фиг. 2 - МУК верхнего уровня, выполненный на платформе промышленного персонального компьютера;

на фиг. 3 - МУК нижнего уровня;

на фиг. 4 - измеритель колебаний (без верхней крышки), использованный для регистрации колебаний в направлении движения исполнительного органа (стола с полупроводниковой пластиной, разделяемой на кристаллы резанием алмазным диском на станке с ЧПУ - установка для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы ЭМ-2165);

на фиг. 5 - исходная осциллограмма колебаний (Т - период механических колебаний с собственной частотой f_0=1/Т) исполнительного органа (стола) станка (установки ЭМ-2165) для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы до введения адаптивного управления параметрами его координатных перемещений с помощью УАПК;

на фиг. 6 - осциллограмма колебаний стола станка (установки ЭМ-2165) для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы после введения адаптивного управления параметрами его координатных перемещений с помощью УАПК.

Показанный на фиг. 1-3 УАПК для адаптивного управления прецизионным оборудованием с ЧПУ имеет двухуровневую архитектуру.

Верхний уровень содержит МУК 1, выполненный на платформе промышленного персонального компьютера (не показан) с ББД 2.

МУК нижнего уровня 3, входы и выходы (не показаны) которого связаны через Ihtercat с выходами и входами (не показаны) МУК 1, содержит

блок 4 сопряжения МУК с контроллерами и энкодерами управляемых приводов;

блок 5 сопряжения МУК с измерителями мощности и параметров колебаний;

управляемые МУК 1 приводы 6.1, 6.2...6.k (k=32 и более), каждый из которых состоит из следующих компонентов:

а) электродвигателей 7.1, 7.2...7.k, роторы (не показаны) которых жестко связаны с энкодерами 8.1, 8.2...8.k соответственно;

б) контроллеры 9.1, 9.2...9.k, управляющие электродвигателями 7.1, 7.2...7.k и снабженные измерителями мощности 10.1, 10.2...10.k, потребляемой электродвигателями 7.1, 7.2...7.k в процессе их функционирования.

Роторы (не показаны) электродвигателей 7.1, 7.2...7.k механически связаны с исполнительными органами 1.1, 11.2....11.k, на которых установлены с возможностью регистрации параметров колебаний в направлении их движения (вращения) измерители параметров колебаний (ИПК) 12.1, 12.2...12.k.

Входы (не показаны) и выходы (не показаны) контроллеров 9.1, 9.2...9.k связаны с соответствующими выходами и входами блока сопряжения 4.

Выходы (не показаны) энкодеров 8.1, 8.2...8.k связаны с соответствующими входами (не показаны) блока сопряжения 4.

Выходы измерителей мощности 10.1, 10.2...10.k и ИПК 12.1, 12.2...12.k связаны с соответствующими входами (не показаны) блока сопряжения 5.

При работе УАПК для адаптивного управления прецизионным оборудованием с ЧПУ предварительно в процессе его отладки с использованием ИПК 12.1, 12.2...12.k, измерителей мощности 10.1, 10.2...10.k и информации с дополнительно установленной связи энкодеров 8.1, 8.2...8.k с блоком 4 в автоматизированном режиме в диапазоне режимов функционирования регистрируются в ББД 2 для каждо-

го из приводов 6.1, 6.2...6.k:

частоты и максимальные амплитуды собственных колебаний исполнительных органов 11.1, 11.2...11.k;

временные задержки между началами движения (вращения) ротора (не показан) каждого электродвигателя 7.1, 7.2...7.k и соответствующего исполнительного органа 11.1, 11.2...11.k;

мощности, потребляемые каждым из приводов 6.1, 6.2...6.k при переходных процессах, предельно возможный градиент увеличения их тягового усилия и скорости соответствующего исполнительного органа 11.1, 11.2...11.k.

При поступлении команды с МУК 1 через блок сопряжения 4 на контроллер 9.1, 9.2...9.k он начинает его отработку в соответствии с алгоритмом внутреннего программного обеспечения. При этом начинается или изменяется скорость движения ротора (не показан) электродвигателя 7.1, 7.2...7.k и с его энкодера 8.1, 8.2...8.k через блок сопряжения 4 сигнал о начале движения (изменении скорости движения) поступает в МУК 1 и там фиксируется. Через определенный промежуток времени с ИПК 12.1, 12.2...12.k через блок сопряжения 5 в МУК 1 поступает сигнал о начале (изменении скорости) движения исполнительного органа 11.1, 11.2...11.k.

В МУК 1 определяется интервал времени задержки начала движения или изменения скорости движения исполнительных органов 11.1, 11.2...11.k и с учетом динамических качеств соответствующего привода 6.1, 6.2...6.k и реализуемого алгоритма движения, формируется дополнительный алгоритм колебаний тягового усилия для снижения или полного гашения механических колебаний соответствующего исполнительного органа 11.1, 11.2...11.k, который в виде дополнительной команды с МУК 1 через блок сопряжения 4 передается в соответствующий контроллер 9.1, 9.2...9.k, который управлением параметрами функционирования электродвигателя 7.1, 7.2...7.k гасит механические колебания с собственной частотой соответствующего исполнительного органа 11.1, 11.2...11.k.

Пример работы УАПК для адаптивного управления прецизионным оборудованием с ЧПУ.

Для примера реализации адаптивного управления оборудования с ЧПУ с использованием УАПК были собраны

показанный на фиг. 2 МУК верхнего уровня 1 на базе промышленного компьютера (шасси IPC-7220-00XE, процессор Core i5 6500. 3,2Ghz, LGA1151, EtherCAT master PCI-1203-32AE Advantech);

показанный на фиг. 3 модуль управления и контроля нижнего с уровня 3, содержащий блок 4 (не показан) сопряжения с МУК 1 контроллера 9 (не показан) и блок 5 (не показан) сопряжения с МУК 1 измерителя мощности 10 (не показан), ИПК 12 (не показан) и энкодера 8 (HEDL 5540 110516 MAXON не показан).

Механизм (не показан), связывающий электродвигатель 7 с исполнительным органом 11 (столом для крепления полупроводниковых пластин, разделяемых на кристаллы), состоял из планетарного зубчатого редуктора (не показан) и зубчато-ременной передачи (не показана).

ИПК, показанный на фиг. 4, был установлен на исполнительном органе (рабочем столе) установки с ЧПУ для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы ЭМ-2165 (не показана) с возможностью регистрации параметров колебаний в направлении его движения. Установка ЭМ-2165 имела 4 основных программно-управляемых приводов 6.

Модуль управления и контроля верхнего уровня 1 был выполнен в виде промышленного компьютера, что позволяло поддерживать работоспособность узлов сети с использованием протокола CoE для циклического опроса состояния каждого привода установки ЭМ-2165 и монитора (не показан) для визуализации человеко-машинного интерфейса (HMI). Повышенный приоритет, а также возможность автоматической передачи специального контрольного сообщения узлам сети модуля управления и контроля верхнего уровня 1 с помощью диспетчера сообщений (NMT-Master) имел привод 6 исполнительного органа 11 (стола).

Система коммуникаций была выполнена на базе мастера сети реального времени PCI-1203-3 AE Advantech с использованием сети EtherCAT, что обеспечивало передачу данных со скоростью 100 Мбит/с и временем отклика системы управления 0,8...1 мкс по схеме клиент-сервер в протоколе CoE. При этом модуль управления и контроля верхнего уровня 1 позволял управлять типом и содержанием сессий, т.е. транзакций, выполнения обмена информационными потоками двумя базовыми способами передачи данных по протоколу CoE: для конфигурации коммуникационной среды SDO и для передачи данных по принципу генератор-потребитель (producer-consumer) PDO.

Протокол CoE имел словарь объектов (object dictionary, OD) со стандартизованным описанием управляемого привода, что позволяло обеспечить возможность доступа через шину EtherCAT к данным верхнего уровня управления и контроля, параметрам и функциям привода с использованием логической системы адресации (index, subindex).

Средство диспетчеризации в протоколе CoE обеспечивало управление сетью NMT (network management) и формирование протоколов для управления коммуникационным состоянием узлов связи с управляемыми модулями управления и контроля приводами 6 и их мониторинга.

При работе УАПК средство диспетчеризации в протоколе CoE позволяло отобразить коммуникационное состояния сетевого узла в диаграмме состояния (state diagram) путем отправки специальных сооб-

щений (NMT messages), а мастер управления сети (network management master) - управлять коммуникационным состоянием подчиненных узлов (network management slaves) сети EtherCAT одной командой, позволяющей поменять состояние привода. Программный модуль протокола CoE был установлен с возможностью диагностики и постоянного мониторинга приводов с использованием сети EtherCAT.

Предварительно в процессе его отладки с использованием измерителя мощности 10 (не показан) и информации с дополнительно установленной связи энкодера 8 (HEDL 5540 110516 MAXON) с блоком сопряжения 4 в автоматизированном режиме в диапазоне режимов функционирования были зарегистрированы в ББД 2 МУК 1:

по результатам автоматизированной обработки показанной на фиг. 5 электронной осциллограммы с использованием программного обеспечения МУК 1 в автоматизированном режиме была определена частота f=1/T=13 Гц, максимальная по напряжению амплитуда собственных колебаний исполнительного органа 11 (стола), равная U_{max}=94 мВ (программное обеспечение контроллера 9 обеспечивало одинаковые ускорения при достижении рабочей скорости подачи за счет сокращения длины холостого хода) и, как следствие статистически одинаковые амплитуды ускорений при разгоне во всем скоростном (100...200 мм/с) диапазоне рабочих значений скоростей движения исполнительного органа 11 (стола), а также соответствующие скоростям движения временные интервалы (задержки) между началом вращения ротора электродвигателя 7 (двигатель постоянного тока EC-max 40 283871 MAXON) и началом линейного движения исполнительного органа 11 (стола);

мощность, потребляемая приводом для разгона исполнительного органа 11 (стола), которая для контроллера 9 (EPOS2 70/10 375711 MAXON) соответствовала его максимальному тяговому усилию;

динамические свойства привода 6 (максимальное ускорение исполнительного органа 11 при максимальном тяговом усилии, определяемое по регистрируемым в МУК 1 значениям энкодера 8 двух последовательно регистрируемых угловых координат электродвигателя 7 привода 6 для максимального тягового усилия при разгоне исполнительного органа 11 (стола) до рабочей скорости подачи.

При работе привода 6 в МУК 1 осуществлялось формирование алгоритма разгона исполнительного органа 11 (стола), обеспечивающего квазистатическую составляющую и периодически изменяющуюся с частотой 13 Гц составляющую тягового усилия привода 6 (периодически изменяющаяся составляющая тягового усилия имела противоположную колебаниям исполнительного органа 11 (стола) фазу, а ее реализация электродвигателем 7 осуществлялась с учетом задержки между началом вращения двигателя 7 и началом линейного движения исполнительного органа 11 (стола), при этом команда на реализацию алгоритма разгона исполнительного органа 11 (стола) через блок сопряжения 4 передавалась контроллеру 9, а ее исполнение контролировалось посредством энкодера 8 и ИПК 12, и при необходимости осуществлялась корректировка параметров периодически изменяющейся составляющей тягового усилия с учетом диагностических данных, поступающих через блок сопряжения 5 с измерителя мощности 10 в МУК 1, где эта информация анализировалась и использовалась для коррекции алгоритма разгона исполнительного органа 11 (стола).

В процессе работы УАПК модуль управления и контроля верхнего уровня 1 обеспечивал работоспособность узлов сети с использованием протокола CoE для циклического опроса состояния каждого привода 6 установки ЭМ-2165, а на его мониторе осуществлялась визуализации человеко-машинного интерфейса (HMI).

Система коммуникаций с использованием сети EtherCAT обеспечивала передачу данных со скоростью 100 Мбит/с и временем отклика системы управления 0,8 мкс по схеме клиент-сервер в протоколе CoE. При этом посредством модуля управления и контроля верхнего уровня 1 осуществлялось управление транзакций и обмен информационными потоками.

В протоколе CoE был сформирован словарь объектов со стандартизованным описанием управляемого привода, включающим PDO и SDO. Через шину EtherCAT осуществлялся доступ к данным верхнего уровня управления и контроля 1, параметрам и функциям привода 6 рабочего движения с использованием логической системы адресации.

Средством диспетчеризации в протоколе CoE обеспечивалось управление сетью NMT (network management) и формирование протоколов для управления коммуникационным состоянием узлов связи с управляемыми модулями управления и контроля приводами и их мониторинга.

При работе УАПК с помощью средства диспетчеризации в протоколе CoE отображалось коммуникационное состояния сетевого узла в диаграмме состояния путем отправки специальных сообщений (NMT messages), а мастером управления сети - управление коммуникационным состоянием подчиненных узлов сети EtherCAT одной командой, в том числе при необходимости изменения состояния привода. Посредством программного модуля протокола CoE осуществлялись диагностика и с использованием сети EtherCAT - постоянный мониторинг приводов 6 установки ЭМ-2165.

Анализ результатов использования предлагаемого УАПК показал, что оно позволило снизить амплитуду механических колебаний исполнительного органа с 94 до 9 мВ (фиг. 6), т.е. более чем на порядок и соответственно увеличить плавность его работы. Предложенное техническое решение позволило существенно расширить возможности адаптивного управления процессами координатных перемещений исполнительных органов из-за задержек во времени между перемещением ротора электродвигателя и

соответствующими этому перемещениями исполнительного органа.

Перечень обозначений.

1 - Модуль управления и контроля верхнего уровня (МУК 1);

2 - блок баз данных МУК 1;

3 - модуль управления и контроля нижнего уровня;

4 - блок сопряжения с контроллерами и энкодерами управляемых приводов;

5 - блок сопряжения с измерителями потребляемой приводом мощности, измерителем параметров колебаний исполнительного органа и энкодерами;

6.1, 6.2...6.k - управляемые МУК 1 приводы (k - число одновременно управляемых приводов);

7.1, 7.2...7.k - электродвигатели управляемых МУК 1 приводов;

8.1, 8.2...8.k - энкодеры управляемых МУК 1 приводов, связанные с электродвигателями 7.1, 7.2...7.k приводов 6.1, 6.2...6.k;

9.1, 9.2...9.k - контроллеры, управляющие параметрами функционирования электродвигателей 7.1, 7.2...7.k приводов 6.1, 6.2...6.k;

10.1, 10.2...10.k - измерители потребляемой приводами 6.1, 6.2...6.k мощности;

11.1, 11.2...11.k - исполнительные органы, связанные с электродвигателями 7.1, 7.2...7.k;

12.1, 12.2...12.k - измерители параметров колебаний исполнительных органов 11.1, 11.2...11.k в направлении их движения.

Источники информации.

1. Патент на изобретение RU № 2279117, МПК G05B 15/02, 19/418.

2. Патент на полезную модель RU 126855, МПК G05B 19/00.

3. Патент на полезную модель РФ № 75483, МПК G05B 19/18.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Универсальный аппаратно-программный комплекс для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с числовым программным управлением, который имеет двухуровневую архитектуру, связанную системой коммуникации, верхний уровень которой выполнен в виде модуля управления и контроля на платформе компьютера, а нижний уровень в виде модуля управления и контроля сформирован из группы приводов, связанных с соответствующими им исполнительными органами, отличающийся тем, что каждый из приводов, состоящий из электродвигателя с установленным на его роторе энкодером, связанным с контроллером, управляющим параметрами функционирования привода, снабжен измерителем потребляемой приводом мощности и измерителем параметров колебаний исполнительного органа в направлении его движения, при этом модуль управления и контроля верхнего уровня выполнен с блоком баз данных о задержках во времени между изменением скорости вращения ротора электродвигателя привода и соответствующим изменением скорости вращения связанного с ним исполнительного органа, о частотах собственных механических колебаний исполнительного органа и динамических свойствах связанного с ним привода, причем модуль управления и контроля нижнего уровня снабжен связанными с модулем управления и контроля верхнего уровня блоком сопряжения с контроллерами управления параметрами функционирования приводов и блоком сопряжения с измерителями потребляемой приводами мощности, измерителями параметров колебаний исполнительного органа и энкодерами, при этом каждый контроллер в блоке сопряжения имеет свою область памяти для полнодуплексной связи с модулем управления и контроля верхнего уровня посредством промышленных протоколов, а каждый из измерителей потребляемой приводами мощности, измерителей параметров колебаний исполнительных органов и энкодеров имеет свою область памяти в блоке сопряжения, обеспечивающую возможность передачи в модуль управления и контроля верхнего уровня диагностической информации.

2. Универсальный аппаратно-программный комплекс для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с числовым программным управлением по п.1, отличающийся тем, что система коммуникаций выполнена с возможностью передачи данных со скоростью не менее 100 Мбит/с и временем отклика системы управления до 1 мкс с использованием сети EtherCAT по схеме клиент-сервер в протоколе CoE, имеющем словарь объектов со стандартизованным описанием управляемого привода, имеющим одинаковую структуру для всех типов приводов для обеспечения возможности доступа через шину EtherCAT ко всем данным верхнего уровня управления и контроля, параметрам и функциям привода с использованием логической системы адресации (index, subindex).

3. Универсальный аппаратно-программный комплекс для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с числовым программным управлением по п.1, отличающийся тем, что средство диспетчеризации в протоколе CoE выполнено в виде службы управления сетью (NMT - network management) и установлено с возможностью предоставления соответствующих протоколов для решения задач управления коммуникационным состоянием узлов связи с управляемыми модулями управления и контроля приводами и их мониторинга.

4. Универсальный аппаратно-программный комплекс для адаптивного управления приводами мно-

гокоординатных систем станка с числовым программным управлением по п.1, отличающийся тем, что средство диспетчеризации в протоколе CoE установлено с возможностью отображения коммуникационного состояния сетевого узла в диаграмме состояния (state diagram) путем отправки специальных сообщений (NMT messages).

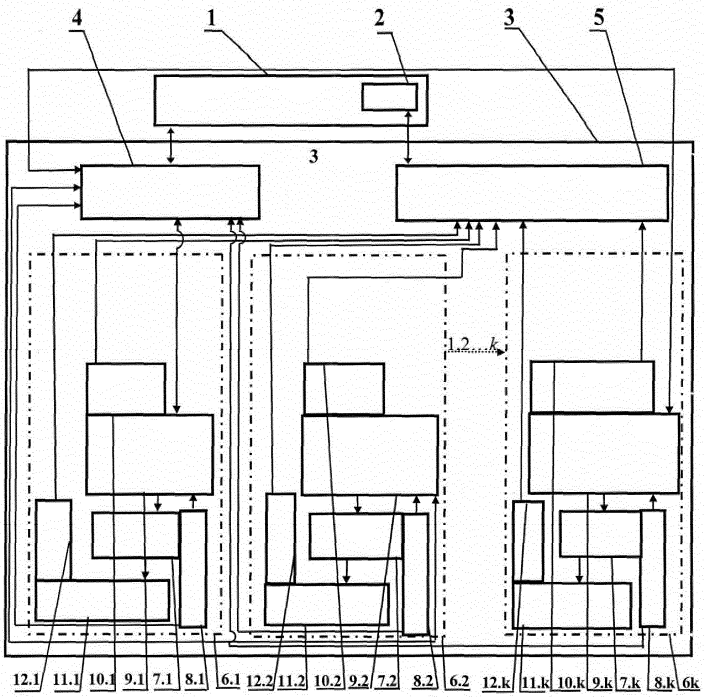
5. Универсальный аппаратно-программный комплекс для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с числовым программным управлением по п.1, отличающийся тем, что мастер управления сети (network management master) установлен с возможностью управления коммуникационным состоянием подчиненных узлов (network management slaves) сети EtherCAT и возможностью одной командой поменять состояние всех узлов или отдельного конкретного узла.

6. Универсальный аппаратно-программный комплекс для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с числовым программным управлением по п.1, отличающийся тем, что модуль управления и контроля верхнего уровня установлен с возможностью управления типом и содержанием сессий, т.е. транзакций, выполнения обмена информационными потоками двумя базовыми способами передачи данных по протоколу CoE: для конфигурации коммуникационной среды SDO и для передачи данных по принципу генератор-потребитель (PDO - producer-consumer).

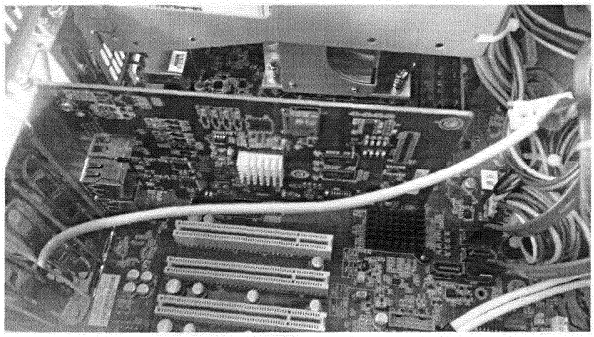
7. Универсальный аппаратно-программный комплекс для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с числовым программным управлением по п.6, отличающийся тем, что программный модуль протокола CoE установлен с возможностью диагностики и постоянного мониторинга всех приводов с использованием сети EtherCAT.

8. Универсальный аппаратно-программный комплекс для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с числовым программным управлением по п.6, отличающийся тем, что модуль управления и контроля верхнего уровня снабжен средствами обеспечения работоспособности узлов сети с использованием протокола CANopen для циклического опроса состояния каждого привода, имеющего повышенный приоритет (NMT-Master), а также автоматической передачи специального контрольного сообщения узлами сети в модуле управления и контроля верхнего уровня.

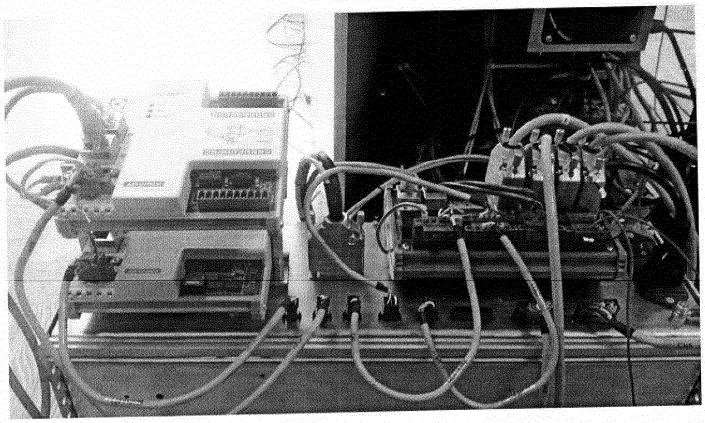
9. Универсальный аппаратно-программный комплекс для адаптивного управления приводами многокоординатных систем станка с числовым программным управлением по п.1, отличающийся тем, что модуль управления и контроля верхнего уровня снабжен средствами визуализации человеко-машинного интерфейса (HMI).



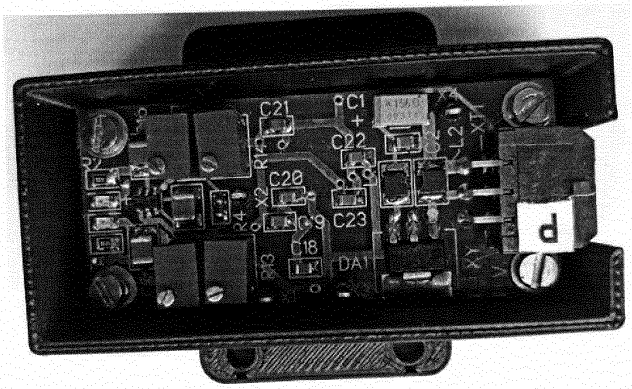
Фиг. 1



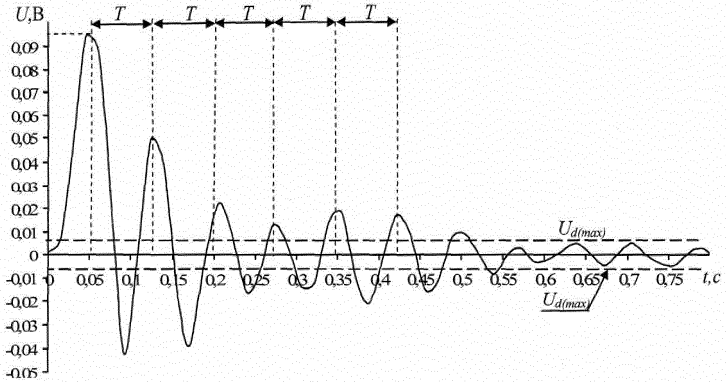
Фиг. 2



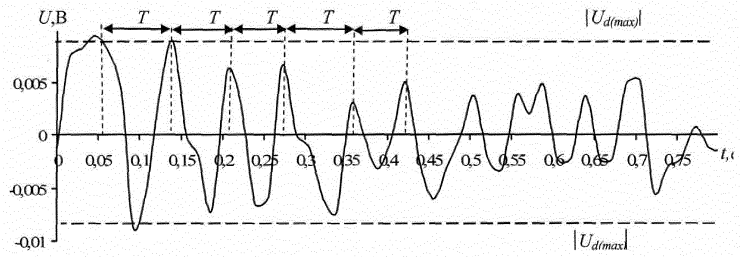
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5


U,B
T
T
T
T
T
|Ud(max)|
0,005
0
-0,005
-0,01
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
|Ud(max)|

Фиг. 6