

## К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОДВИГАТЕЛЯМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРОЧНОЙ УСТАНОВКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ СВАРКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЁМКОСТЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

В статье рассматривается процесс управления сервоприводами с целью регулирования скорости и обеспечения синхронного вращения валов силовых агрегатов при сварке с использованием сварочной установки СБ-2000. На основе технологического процесса сварки крупногабаритных емкостей ракет-носителей модернизированы основные силовые агрегаты. Предлагается структурное решение для управления технологическим процессом и синхронизации работы электроприводов с использованием серводвигателей. Разработаны блок-схема алгоритма и техническое решение управления сервоприводами с использованием модулей SINAMICS S120 фирмы SIEMENS.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления технологическим процессом, распределенная система управления, программируемый логический контроллер, электропривод с векторным управлением, синхронный серводвигатель, преобразования Парка и Кларк.

В связи с новыми распоряжениями Правительства РФ касательно развития авиаракетостроения в нашей стране началась крупномасштабная модернизация соответствующих предприятий. В первую очередь на предприятиях началось обновление материально-технической базы, модернизация станков и закупка нового оборудования. Поэтому на ПО «Полёт» — филиале ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» в городе Омске было произведено обновление станочного парка. Одним из обновленных станков стал сварочный станок СБ-2000. Для соответствия современным требованиям производства, внедрения технологий безлюдного производства предлагается создать на базе данного станка универсальный обрабатывающий центр для сварки крупногабаритных емкостей ракет-носителей.

В предыдущей статье рассматривались функциональная и структурная схемы данной установки в целом [1]. В данной статье рассматриваются: режимы работы сварочной установки, основные силовые агрегаты, анализ и выбор средств управления работой электродвигателей, структура системы управления электродвигателями, а также блок-схема алгоритма управле-

ния синхронным вращением валов серводвигателей.

Автоматизированная система управления (АСУ) сварочного комплекса СБ-2000 представляет собой распределенную систему управления (PCY), включающую подсистемы сбора и отображения информации, автоматического регулирования, дискретно-логического управления. АСУ предназначена для:

- регулирования вращения валов синхронных электродвигателей передней и задней бабок;
- регулирования продольного перемещения тележек фрезерной и сварочной головок;
- регулирования подач сварочной и фрезерной головок;
- регулирования вращения фрезерной головки;
- регулирования подачи тока на сварочную головку;
- регулирования уровня смазки в узлах приводов, системе охлаждения;
- контроля сварных швов;
- перемещения тележек поддерживающих люнетов, корзин передней и задней бабок, порталных роботов, телескопического вала задней бабки.

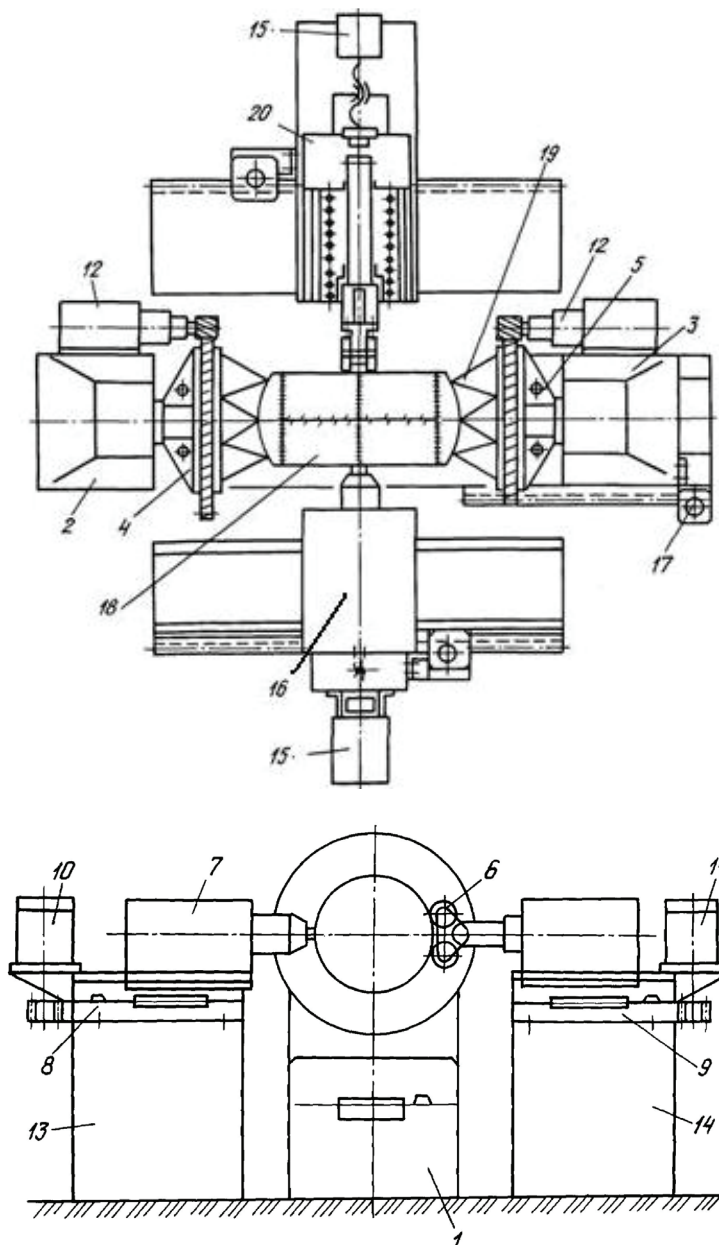


Рис. 1. Схема сварочной установки СБ-2000:

- 1 — основание; 2 — передняя бабка; 3 — задняя бабка;  
 4, 5 — планшайбы; 6 — сварочная головка; 7 — фрезерная тележка; 8, 9 — каретки; 10, 11 — электроприводы продольного перемещения кареток; 12 — электроприводы вращения планшайб; 13, 14 — рельсы, предназначенные для перемещения кареток; 15 — электроприводы поперечных подач сварочной головки и фрезерной тележки; 16 — датчик положения фрезерной тележки; 17 — электропривод задней бабки; 18 — заготовка (изделие); 19 — технологическая оснастка; 20 — датчик положения сварочной головки

Сварочная установка СБ-2000 (рис. 1) используется для дуговой сварки кольцевых и/или продольных швов при изготовлении изделий из любых сплавов и состоит из следующих основных узлов: сварочной установки, передней и задней бабки, фрезерной тележки, двух порталных роботов и двух автоматических тележек поддерживающих люнетов.

На основании 1 неподвижно смонтирована передняя бабка 2 и подвижно смонтирована задняя бабка 3 с возможностью осевого возвратно-поступательного перемещения. Установленные

на бабках планшайбы 4 и 5 оснащены синхронными приводами их вращения 12 и технологической оснасткой 19 для крепления свариваемого изделия 18 — корзины с лопастями на гидроприводах. Сварочная и фрезерная головки 6 и 7 смонтированы на каретках 9 и 8 соответственно. Они оснащены приводами 10 и 11 продольного синхронного перемещения вдоль оси бабок.

Каретки установлены оппозитно на рельсах 13 и 14. Фрезерная головка оснащена приводом 15 поперечной подачи. Для контроля подачи фрезерной головки предназначен встроенный в при-

вод датчик положения 16. Для перемещения задней бабки используют привод 17.

Рабочий инструмент сварочной головки 6 имеет привод 15 поперечного перемещения и датчик положения 20.

Работу установки рассмотрим на примере сварки кольцевого и продольных швов двух бачек топливного бака.

Обечайки изделия 18 посредством технологической оснастки 19 устанавливаются на планшайбы 4 и 5. Для этого в системе предусмотрены два промышленных робота ПР1 и ПР2 (на рис. 1 они не показаны).

Приводами 10 и 11 выводят сварочную головку 6 и фрезу 7 в исходное для сварки положение, т.е. располагают рабочие элементы головки и фрезы напротив стыка будущего сварного шва. Управление перемещением сварочной головки 6 сдублировано с перемещением фрезерной головки 7.

При подводе сварочной головки и фрезы к свариваемому изделию подается команда на включение приводов 12 вращения планшайб 4 и 5.

Вначале происходит поперечная подача фрезерной головки 7 приводом 15, а затем фрезерование бороздки. Фрезерование стыка под создание сварного шва начинается с вращения корзин передней и задней бабки на  $+360^\circ$  и  $-360^\circ$  соответственно со скоростью 0,05 об/мин. Затем производится фрезерование канавки под сварку кольцевого шва. После этого выдается команда приводу подачи 15 сварочной головки 6, выставляется расстояние между головкой и сварным швом и производится сварка шва. Процесс сварки шва включает в себя 3 этапа: прогрев стыка заготовок, приварка стыка и сварка стыка. Это также происходит при синхронном вращении корзин передней и задней бабок на  $+360^\circ$  и  $-360^\circ$  соответственно со скоростью 0,05 об/мин.

По окончании сварки кольцевого шва сварочная головка и фреза возвращаются в исходное положение. В случае ошибки при сварке происходит доработка по специальной программе исправления ошибок.

При сварке продольного шва все операции повторяются. Отличием является то, что в начале сварки включают приводы продольной подачи 10 и 11, обеспечивающие перемещение каретки 8 с фрезерной головкой 7 и каретки 9 со сварочной головкой 6.

После сварки готового изделия и при отсутствии отклонений от заданных технологией требований оно отправляется в рентген-камеру, где происходит сканирование швов на наличие просветов, неровностей, пузырьков воздуха внутри самого шва. Сканирование производится в отдельной камере.

Одной из главных задач автоматизации сварочной установки СБ-2000 является задача синхронизация вращения валов электроприводов планшайб передней и задней бабок. Необходимо обеспечивать синхронное вращение со скоростью 0,01 – 0,7 об/мин. При этом мощности электродвигателя должно хватать для вращения корзины с закрепленными заготовками большой массы. Масса заготовок изменяется с нараста-

нием свариваемой конструкции. Она колеблется от 100 до 3000 кг (масса всей конструкции). При этом должен быть соблюден алгоритм синхронной работы основных силовых агрегатов, а также очередность их включения.

Поэтому основная нагрузка в данном технологическом процессе ложится на силовые агрегаты установки, которыми являются электро- и гидроприводы.

В качестве основных силовых агрегатов для электроприводов М1, М2, М3, М4, М6 [1] передней и задней бабок, а также фрезерной тележки предлагается применить синхронные серводвигатели 1FT6 SIEMENS (3000 об/мин, самохлаждение, IP65 IM B5) с частотным управлением. Эти электроприводы содержат инкрементальные фотоэлектрические угловые датчики положения (энкодеры), входящие в состав синхронных серводвигателей 1FT6 SIEMENS передней, задней бабок и фрезерной тележки. Данный способ реализации контроля положения вала электродвигателя позволит без лишних затрат времени и средств смонтировать приводы и обеспечивать контроль их работы. Также в состав данных приводов входят стояночные тормоза, предназначенные для стопора вала синхронных серводвигателей 1FT6 SIEMENS передней, задней бабок и фрезерной тележки.

Данная модель электродвигателя обладает характеристиками, удовлетворяющими техническим требованиям. Управление осуществляется через модуль приводов SINAMICS S120, который выступает в роли ПИД-регулятора [2, 3].

В обрабатываемом центре предлагается использовать несколько электроприводов с системой управления на базе трех модулей приводов SINAMICS S120 [4].

Превосходная адаптация системы привода SINAMICS S120 к самым разным задачам возможна благодаря разделению силовой части и блока регулирования (модуль управления). Тип модуля управления выбирается с учетом количества регулируемых приводов и требуемого качества регулирования, силовая часть — в соответствии с мощностью двигателей, необходимости рекуперации энергии в сеть или обмена энергией между приводами. Соединение модулей управления и силовых частей выполняется очень просто с помощью цифрового системного интерфейса DRIVE-CLiQ.

В качестве модуля управления можно выбрать один из следующих: CU310, CU320 или SIMOTION D.

Для управления отдельным приводом применяется модуль управления CU310 с интерфейсом PROFIBUS (CU310 DP) или PROFINET (CU310 PN). Дополнительно CU310 имеет вход для подключения TTL/HTL датчика и цифровые входы/выходы.

Модуль управления CU320 предназначен для одновременного регулирования несколькими приводами. При этом от одного модуля управления CU320 могут управляться до 10 приводов в режиме U/f — управления, или 6 приводов с сервоприводами, или 4 привода с векторным управлением. В модуле управления CU320 можно настраивать связи между отдельными приводами и выполнять простые технологические функции.

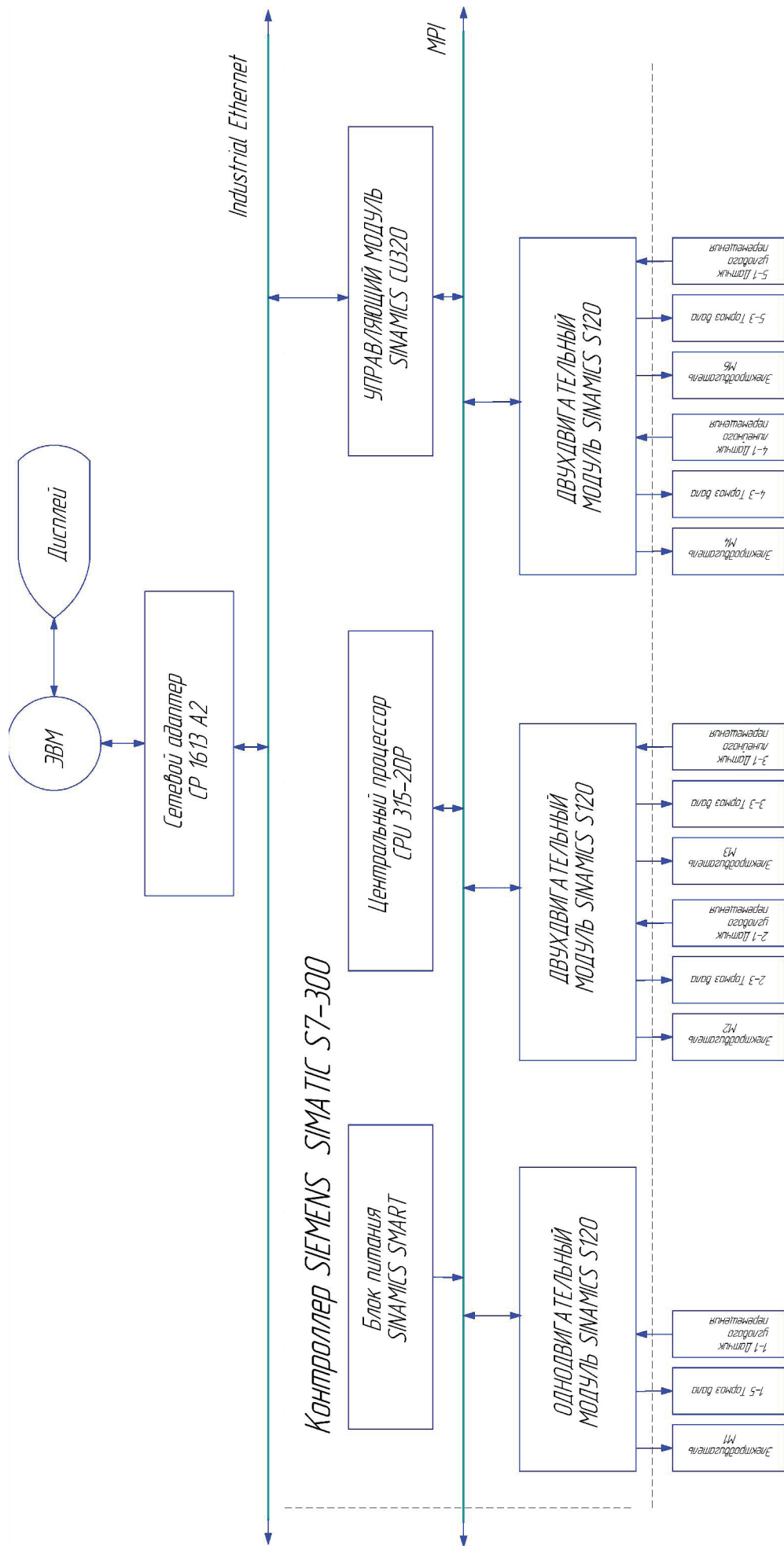
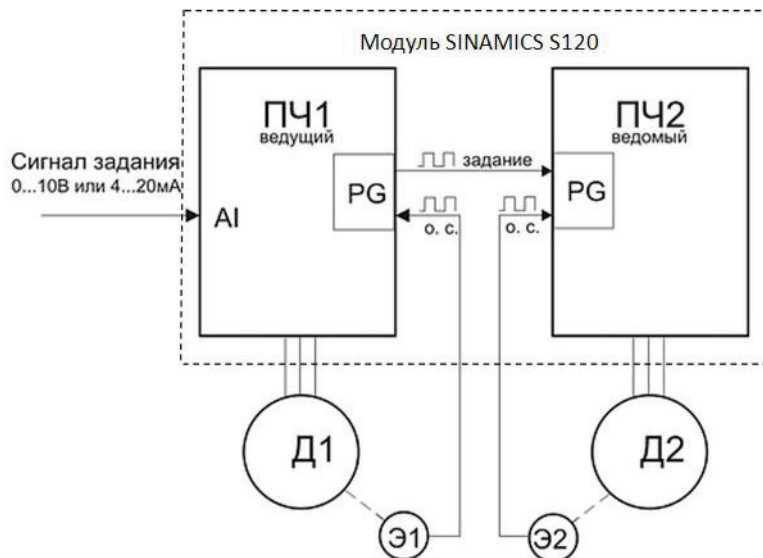
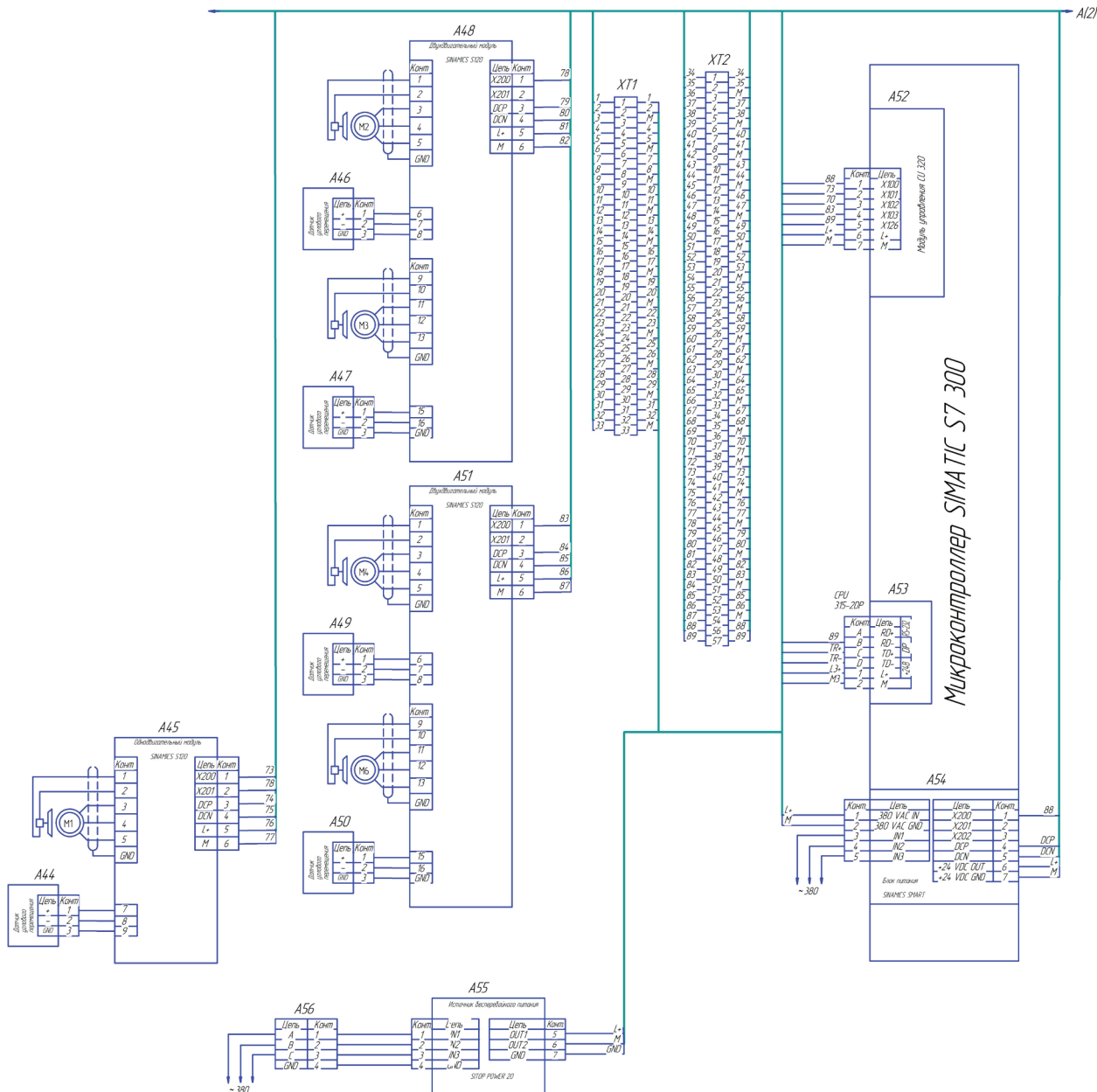


Рис. 2. Структурная схема управления электроприводами



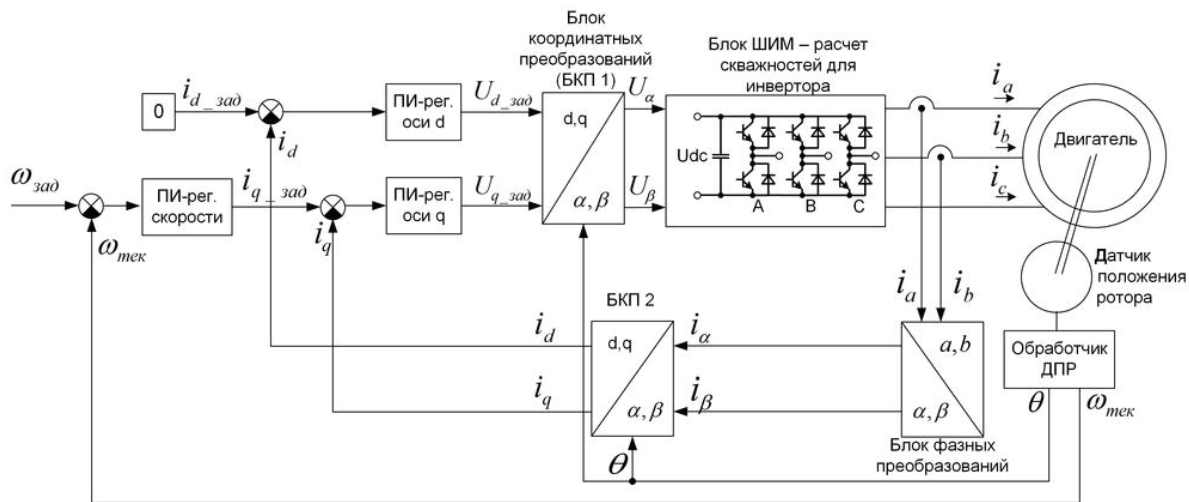


Рис. 5. Структура электропривода с векторным управлением и датчиком положения ротора (энкодером)

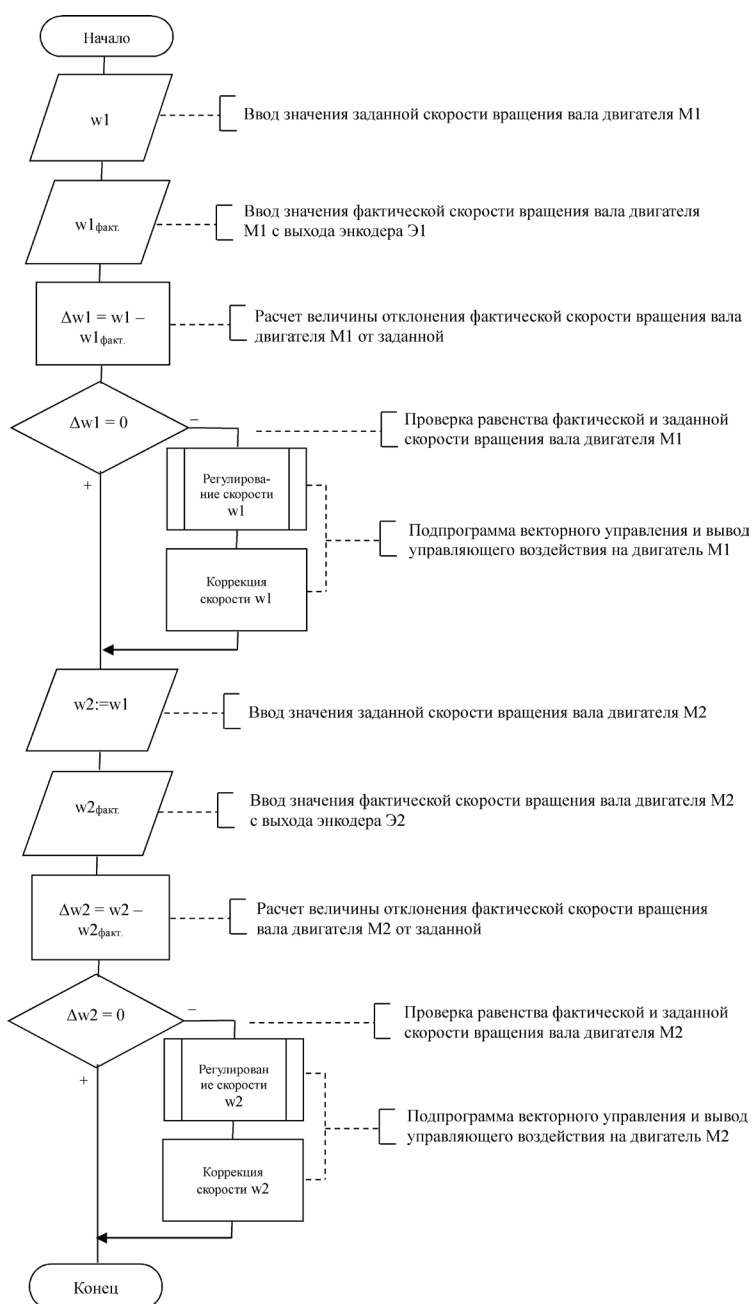


Рис. 6. Блок-схема алгоритма синхронизации скоростей вращения выходных валов серводвигателей

На рис. 2 приведена предлагаемая для решения поставленной задачи структурная схема управления данными электроприводами.

Схема подключения приводов изображена на рис. 3.

Основной задачей данной системы является обеспечение синхронного вращения валов электродвигателей М1, М2, М3, М4, М6 по заданному алгоритму с целью обеспечения соблюдения технологического процесса сварки.

Так, для синхронного вращения корзин передней и задней бабок необходимо синхронное вращение выходных валов электродвигателей М1 и М2. Для этого модуль SINAMICS S120 позволяет реализовать следующий порядок: один из преобразователей частоты (ПЧ1) работает в режиме задатчика скорости и является *ведушим*, а второй — ПЧ2, являясь *ведомым*, поддерживает необходимую синхронную скорость вращения.

Порядок формирования информационных сигналов модуля SINAMICS S120 показан на рис. 4.

Анализ методов управления серводвигателями позволяет сделать вывод о том, что в основе таких систем лежит скалярное и векторное управление данным типом электродвигателей. Расчет отклонения фактической скорости от заданной и соответствующая коррекция ошибки может осуществляться с использованием современных методов решения данной задачи с использованием нейронных сетей, нечеткой логики и стандартной настройки с использованием двух ПИ-регуляторов [5–13]. Наиболее перспективным [12, 14] является векторное управление с использованием датчика положения ротора, схема которого показана на рис. 5.

Для реализации векторного управления (рис. 5) измеряют мгновенные значения токов в двух [14] или трех фазах [15]. Сигналом задания скорости для ПЧ1 будет внешний сигнал, а для ПЧ2 — сигнал с выхода ПЧ1. В блоках координатных преобразований БКП1 и БКП2 производится преобразование Парка, а блок фазных преобразований служит для преобразований Кларк. Поддержание (синхронизацию) значений угловой скорости обеспечивает ПИ-регулятор скорости внешнего контура управления, входным сигналом для которого является сигнал с выхода соответствующего энкодера. Внутренним контуром в данной схеме являются ПИ-регуляторы токов  $i_d$  и  $i_q$ , позволяя реализовать, таким образом, систему подчиненного регулирования.

Блок-схема алгоритма управления [1, 16] для синхронизации скоростей вращения  $w_1$  и  $w_2$  электродвигателей М1 и М2 планшайб передней и задней бабок соответственно показана на рис. 6.

На вход ведущего преобразователя частоты ПЧ1 поступает аналоговый сигнал, который задает синхронную скорость вращения  $w_1$ . Контроль выходной скорости вращения вала М1 осуществляется энкодером Э1. Входным сигналом для ведомого преобразователя частоты ПЧ2 является выходной сигнал с ПЧ1. В результате работы системы сигнал о скорости вращения  $w_2$  с энкодера Э2 позволяет сформировать необходимое управляющее воздействие для двигателя М2, расчет которого происходит по заданной

подпрограмме регулирования, структура которой показана на рис. 5.

Подобная схема синхронизации работы серводвигателей может применяться в электроприводах в различных областях промышленности и техники. Особую значимость она имеет в системах, в которых несколько электродвигателей дополняют друг друга, выполняя распределенную работу. Также данное решение может быть применено для реализации мехатронных модулей в робототехнике.

#### Библиографический список

1. Ибатуллин А. А., Шеков И. С. Автоматизация технологического процесса сварки топливных баков ракет. // Россия молодая: передовые технологии — в промышленности! Материалы IV Всерос. молод. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 15–17 нояб. 2011 г.: в 2 кн. Кн.1 / ОмГТУ. Омск, 2011. С. 32–34.
2. Промышленные компьютеры. Каталог продуктов SIEMENS IA/DT 2009.
3. Программируемые контроллеры SIMATIC S7. Каталог продуктов SIEMENS IA/DT 2009.
4. Федотов А. В. Вопросы разработки систем автоматизации технологических процессов и производств. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. 63 с.
5. Qiao W., Tang X., Zheng S. [et al.]. Adaptive two-degree-of-freedom PI for speed control of permanent magnet synchronous motor based on fractional order GPC // ISA Transactions. 2016. Vol. 64. P. 303–313. DOI: 10.1016/j.isatra.2016.06.008.
6. Jona R., Wanga Z., Luoc C. [et al.]. Adaptive robust speed control based on recurrent elman neural network for sensorless PMSM servo drives // Neurocomputing. 2017. Vol. 227. P. 131–141. DOI: 10.1016/j.neucom.2016.09.095.
7. Meoni F., Carricato M. Optimal selection of the motor-reducer unit in servo-controlled machinery: A continuous approach // Mechatronics. 2018. Vol. 56. P. 132–145. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.11.002.
8. Saha N., Panda A. K., Panda S. Speed control with torque ripple reduction of switched reluctance motor by many optimizing liaison technique // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2018. Vol. 5, Issue 3. P. 829–842. DOI: 10.1016/j.jesit.2016.12.013.
9. Pohl L., Vesely I. Speed Control of Induction Motor Using  $H_\infty$  Linear Parameter Varying Controller // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49, Issue 25. P. 74–79. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.013.
10. Vonkomer J., B'elai I., Huba M. Disturbance observer control for AC speed servo with improved noise attenuation // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, Issue 1. P. 4300–4305. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.841.
11. Bellomo D., Babuska R., Naso D. Adaptive fuzzy control for speed-reference tracking in nonlinear servo drives // IFAC Proceedings Volumes. 2006. Vol. 39, Issue 1. P. 1091–1096. DOI: 10.3182/20060329-3-AU-2901.00175.
12. Low K. S., Lim K. W., Rahman M. F. A microprocessor based fully digital AC servo drive // Microprocessors and Microsystems. 1997. Vol. 20, no. 7. P. 429–436. DOI: 10.1016/S0141-9331(97)01118-6.
13. Мирзаев Р. А., Смирнов Н. А. Система автоматического управления сервоприводами // Вестник СибГАУ. 2014. № 1 (53). С. 161–164.
14. Ковальчук Д. А., Мазур А. В. Векторное управление синхронными электродвигателями // Автоматизация технологических и бизнес процессов. 2014. № 17. С. 71–75.

15. Векторное управление электродвигателем «на пальцах» // habr. URL: [https://habr.com/ru/company/nprf\\_vektor/blog/367653/](https://habr.com/ru/company/nprf_vektor/blog/367653/) (дата обращения: 19.02.2019).

16. ГОСТ 19.701–90 (ИСО 5807–85). Единая система программной документации (ЕСПД). Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения. Введ. 1992–01–01. М.: Стандартинформ, 1990. 23 с.

---

**ИБАТУЛЛИН Альберт Амирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и робототехника».

SPIN-код: 1740-1172

AuthorID (РИНЦ): 685216

ORCID: 0000-0002-8910-6412

Адрес для переписки: [ibatullin77@yandex.ru](mailto:ibatullin77@yandex.ru)

**ГЕБЕЛЬ Елена Сергеевна**, кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Автоматизация и робототехника».

SPIN-код: 1256-0879

ORCID: 0000-0003-1811-8755

AuthorID (SCOPUS): 55574609100

ResearcherID: O-4211-2014

Адрес для переписки: [Es@mail.ru](mailto:Es@mail.ru)

**ГУДИНОВ Владимир Николаевич**, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и робототехника».

Адрес для переписки: [Cudinow@mail.ru](mailto:Cudinow@mail.ru)

#### Для цитирования

Ибатуллин А. А., Гебель Е. С., Гудинов В. Н. К вопросу управления серводвигателями автоматической сварочной установки, предназначенной для сварки крупногабаритных ёмкостей ракет-носителей // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 38–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-38-45.

Статья поступила в редакцию 18.03.2019 г.

© А. А. Ибатуллин, Е. С. Гебель, В. Н. Гудинов