



Журнал индексируется системами РИНЦ и Google Scholar.
Сведения о журнале публикуются в международной системе «Ulrich's Periodicals Directory»

Редакционная коллегия

Главный научный редактор

Корчунов А.Г. – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, профессор, доктор технических наук.

Заместитель главного научного редактора

Анцупов В.П. – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, профессор, доктор технических наук.

Бобарикин Ю.Л. – Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, доцент, кандидат технических наук, г. Гомель, Республика Беларусь.

Горбатюк С.М. – Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Университет науки и технологий МИСиС), профессор, доктор технических наук.

Кузьминов А.Л. – Череповецкий государственный университет, профессор, доктор технических наук.

Раскатов Е.Ю. – Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, профессор, доктор технических наук.

Томило В.А. – Белорусский национальный технический университет, профессор, доктор технических наук, г. Минск, Республика Беларусь.

Ответственный редактор

Слободянский М.Г. – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, доцент, кандидат технических наук.

Журнал основан в 2012 г.
Периодичность выхода – 2 номера в год.

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл.,
г. Магнитогорск,
пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
издательский центр.

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл.,
г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 25.09.2026. Заказ 317.
Тираж 300 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

**С.Б. Сидельников, А.В. Парубок,
Д.С. Ворошилов, Р.И. Галиев, А.П. Самчук**
Конструкции оборудования и инструмента для
получения длинномерных деформированных
полуфабрикатов из магния и его сплавов
методом совмещенной прокатки-прессования

3

**Д.Г. Олейник, А.Ю. Столяров,
А.Р. Базыков, О.А. Белан**
Прогнозирование долговечности матрицы для
штамповки болтов с фланцем при
малоцикловом усталостном разрушении

14

Е.А. Понамарева
Физическое моделирование процесса вскрытия
сталевыпускного канала металлургического
ковша с использованием катапульты

22

**В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов,
М.Е. Гойдо, С.И. Смышляев**
Моделирование работы системы слежения за
кромкой полосы агрегата продольной резки

30

Д.А. Власенко, А.А. Харитоненко
Сравнительный анализ условий контакта
материала в рабочем пространстве валковых и
валково-барабанных дробильно-
измельчительных машинах

36

**С.М. Вайцехович, Л.А. Рябичева,
И.И. Белозир**
Исследование процессов изготовления
спирально-профильных труб для
совершенствования производства
теплообменных, сепарационных и сильфонных
аппаратов

44

**S.B. Sidelnikov, A.V. Parubok, D.S. Voroshilov,
R.I. Galiev, A.P. Samchuk**
Designs of equipment and tooling for producing
long-length semi-finished products from magnesium
and its alloys by the combined rolling-extrusion
method

3

**D.G. Oleynik, A.Yu. Stolyarov,
A.R. Bazykov, O.A. Belan**
Predicting the durability of a die for stamping flange
bolts under low-cycle fatigue failure

14

E.A. Ponamaryova
Physical modeling of the process of opening the
steel-tapping channel of a ladle using a catapult

22

**V.V. Bodrov, R.M. Bagautdinov, M.E. Goydo, S.I.
Smyshlyayev**
Simulation of the operation of the strip edge tracking
system for a slitting machine

30

D.A. Vlasenko, A.A. Kharitonenko
Comparative analysis of contact conditions of
material in the working space of roll and roll-drum
crushing and grinding machines

36

S.M. Vaitsekovich, L.A. Ryabicheva, I.I. Belozir
Study of manufacturing processes of spiral-profile
pipes to improve the production of heat-exchange,
separation and bellows apparatus

44



УДК 621.771.068

**В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов,
М.Е. Гойдо, С.И. Смышляев**
ООО «Уральский инжиниринговый центр»
г. Челябинск, Россия
E-mail: goido@cheltec.ru
Дата поступления 22.04.2026

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА КРОМКОЙ ПОЛОСЫ АГРЕГАТА ПРОДОЛЬНОЙ РЕЗКИ

Аннотация

Рассмотрено моделирование работы системы слежения за кромкой полосы агрегата продольной резки. Работа выполнена в связи с необходимостью замены дросселирующих гидрораспределителей с пропорциональным электрическим управлением, ранее использовавшихся в составе подобных систем в ООО «ВИЗ-Сталь» (г. Екатеринбург). При моделировании связь между изменением положения золотника гидрораспределителя относительно его исходного нейтрального положения и электрическим управляющим сигналом, поступающим со стороны контроллера на электронный блок управления гидрораспределителя, представлена в виде колебательного звена, параметры которого определены на основании паспортной амплитудной частотной характеристики гидрораспределителя. На основании регулировочной характеристики гидрораспределителя выполнен расчет значений коэффициента проводимости его рабочих окон для ряда значений относительного смещения золотника гидрораспределителя из исходного нейтрального положения. Указанная зависимость использовалась при моделировании в табличной форме. В ходе моделирования определены параметры пропорционально-интегрального регулятора, при которых обеспечиваются требования к качеству переходных процессов и к допускаемой погрешности отслеживания положения кромки полосы в режиме автоматического управления. Эксплуатация системы слежения с предложенным для применения гидрораспределителем подтвердила правильность и целесообразность принятых технических решений.

Ключевые слова: агрегат продольной резки; система слежения за кромкой полосы; моделирование работы; выбор параметров регулятора.

Введение

В течение продолжительного периода времени в ООО «ВИЗ-Сталь» (г. Екатеринбург) в гидросистемах привода моталок агрегатов продольной резки (АПР) для осуществления слежения за кромкой полосы листового металла использовались двух-каскадные электрогидравлические усилители (ЭГУ) (дросселирующие гидрораспределители с пропорциональным электрическим управлением) типа СГ4-200 производства ПАО «ММЗ «Рассвет» (г. Москва).

В связи с ограниченными возможностями приобретения указанных ЭГУ перед ООО «Уральский инжиниринговый центр» была поставлена задача найти им замену из

числа серийно выпускаемых и широко представленных на рынке гидроаппаратов подобного назначения.

В качестве такого гидроаппарата был предложен регулирующий однокаскадный гидрораспределитель с пропорциональным электрическим управлением и встроенной электроникой типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V производства фирмы «Rexroth Bosh Group» (Германия). У этого гидрораспределителя согласно его паспортным данным пропускная способность составляет 75 л/мин при перепаде давления на полностью открытых проходных сечениях напорного и сливного рабочих окон, равном 1,0 МПа [1].

У ЭГУ СГ4-200 согласно рекламным данным на него пропускная способность составляет 200 л/мин при перепаде давления на полностью открытых проходных сечениях напорного и сливного рабочих окон, равном 5,0 МПа.

При пересчете на перепад давления 1,0 МПа пропускная способность ЭГУ СГ4-200 составляет 89,44 л/мин, т.е. несколько больше, чем у регулирующего гидрораспределителя 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V при прочих равных условиях.

На основании данного обстоятельства, а также других имеющихся различий в характеристиках гидроаппаратов СГ4-200 и 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V было принято решение проверить допустимость предлагаемой замены путем моделирования работы системы слежения за кромкой полосы (ССКП) для агрегата продольной резки АПР-8.

Основная часть

В результате проведенного визуального контроля (рисунок 1) изменения положения кромки полосы на входе моталки (в месте установки датчика положения кромки полосы) было установлено, что при работе агрегата АПР-8 значение указанного изменения не превосходит значение ± 5 мм при круговой частоте, не превышающей 0,8 Гц. С учетом указанных данных при моделировании работы ССКП принято изменение положения Δy кромки полосы в направлении, перпендикулярном по отношению к направлению перемотки рулона, по гармоническому закону:

$$\Delta y = y_a \sin(2\pi f t), \quad (1)$$

где y_a , f - соответственно амплитуда и круговая частота изменения положения кромки полосы ($y_a = 5$ мм; $f = 0,8$ Гц);

t - время.

Датчик положения кромки полосы и контроллер, посредством которого обрабатываются сигналы, поступающие от указанного датчика, и формируется сигнал управления, подаваемый на вход электронного блока регулирующего гидрораспределителя, при моделировании рассматривались как устройства, работающие без запаздывания.

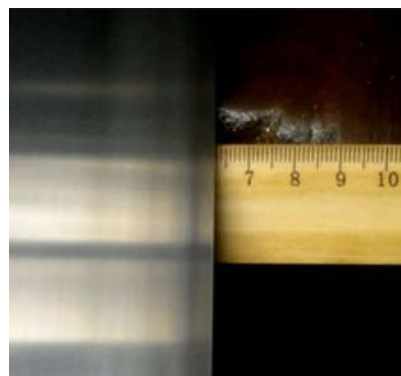


Рисунок 1. Фотография, иллюстрирующая проведение визуального контроля за изменением положения кромки полосы на входе моталки агрегата продольной резки

Следует отметить, что существует большое число датчиков, основанных на разных принципах действия (инфракрасные, ультразвуковые, оптические, индуктивные), которые могут использоваться для контроля положения кромки полосы [2]. Среди них выделяется датчик положения кромки полосы (индуктивный преобразователь перемещения) типа ВТИЮ.1820 производства АО НПК «ТЕКО» (г. Челябинск). Данный датчик (в отличие, например, от оптических датчиков) практически не чувствителен к загрязненности окружающего воздуха и позволяет осуществлять контроль положения кромки полосы с высокой точностью при наличии колебаний полосы в направлении, перпендикулярном ее поверхности.

Моделирование работы регулирующего гидрораспределителя типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V выполнено на основании его паспортных амплитудной (АЧХ) и фазовой (ФЧХ) частотных (рисунок 2) и регулировочной (рисунок 3) характеристик. Связь между изменением положения z золотника гидрораспределителя относительно его исходного нейтрального положения и электрическим управляющим сигналом U , поступающим со стороны контроллера на электронный блок управления гидрораспределителя, представлена в виде колебательного звена и описывается, соответственно, уравнением

$$T^2 \frac{d^2 z}{dt^2} + 2\xi T \frac{dz}{dt} + z = kU,$$

где T , ξ , k – соответственно постоянная времени, коэффициент демпфирования и

коэффициент усиления колебательного звена.

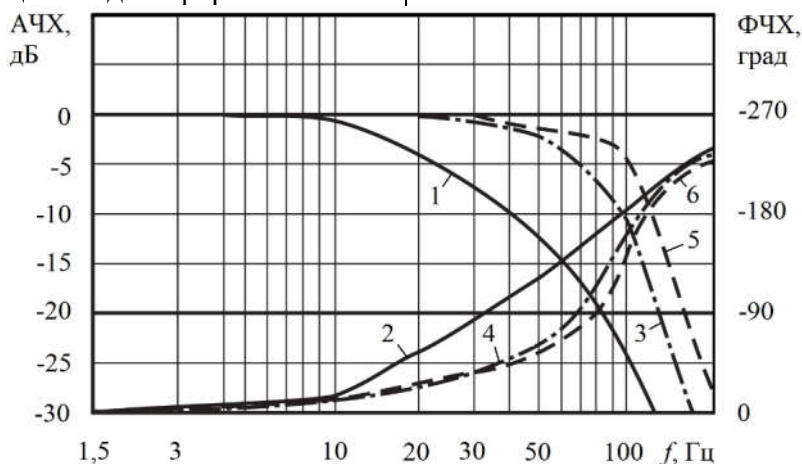


Рисунок 2. Амплитудные (графики 1, 3, 5) и фазовые (графики 2, 4, 6) частотные характеристики гидрораспределителя типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V для случаев изменения управляющего электрического сигнала в диапазонах $\pm 100\%$ (графики 1, 2), $\pm 25\%$ (графики 3, 4) и $\pm 10\%$ (графики 5, 6)

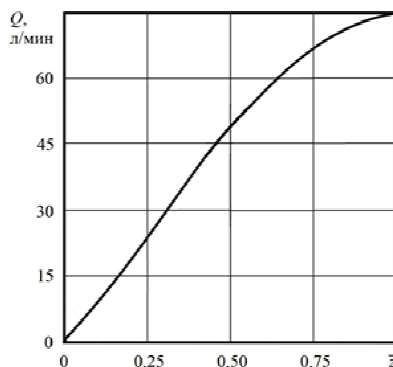


Рисунок 3. График зависимости расхода Q рабочей жидкости через рабочее окно гидрораспределителя типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V от относительного смещения $\bar{z} = z/z_{\max}$ золотника гидрораспределителя относительно его исходного нейтрального положения при перепаде давления на рабочем окне, равном $\Delta p_{p.o} = 0,5$ МПа ($z_{\max}$ – полный ход золотника из нейтрального положения в крайнее)

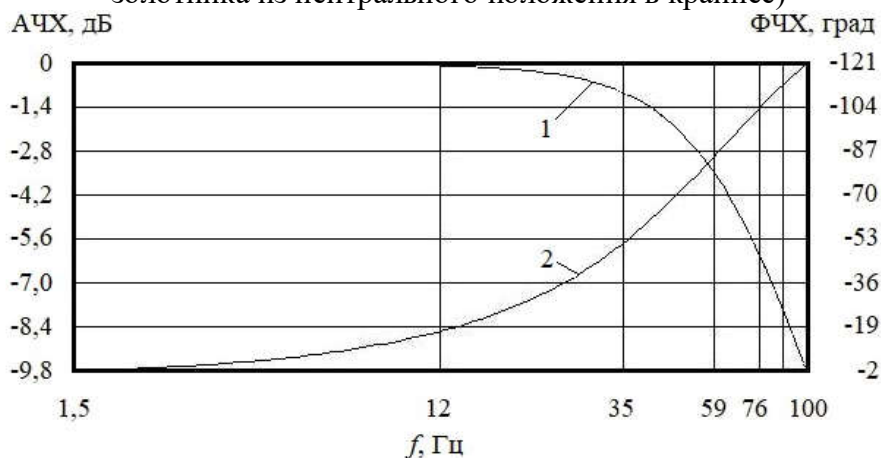


Рисунок 4. Амплитудная (график 1) и фазовая (график 2) частотные характеристики колебательного звена ($T = 2,604 \cdot 10^{-3}$ с, $\xi = 0,7734$), соответствующие АЧХ и ФЧХ гидрораспределителя типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V для случая изменения управляющего электрического сигнала в диапазоне $\pm 25\%$

Амплитудные и фазовые частотные характеристики регулирующего гидрораспределителя существенно зависят от диапазона изменения входного управляющего сигнала, ухудшаясь с увеличением указанного диапазона (см. рисунок 2). В связи с этим предварительно были проведены расчеты работы системы слежения, в ходе которых определены границы изменения управляющего сигнала, необходимые для обеспечения допустимой погрешности $\delta_{\text{доп}} = \pm 0,5$ мм отслеживания положения кромки полосы в режиме автоматического управления. В ходе этих расчетов установлено, что при принятом законе (1) изменения положения Δy кромки полосы в случае применения гидрораспределителя типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V погрешность $\delta_{\text{доп}} = \pm 0,5$ мм обеспечивается при изменении управляющего электрического сигнала на его входе в пределах ± 25 % от максимального значения этого сигнала. Поэтому окончательные расчеты проведены с параметрами колебательного звена, соответствующими АЧХ и ФЧХ гидрораспределителя для указанного диапазона изменения входного управляющего сигнала (рисунок 4).

На основании регулировочной характеристики (см. рисунок 3) гидрораспределителя с учетом того обстоятельства, что данная характеристика получена при перепаде давления на каждом из его рабочих окон, равном $\Delta p_{p.o} = 0,5$ МПа, по формуле

$$G_{p.o} = Q / \sqrt{\Delta p_{p.o}},$$

где Q – расход рабочей жидкости через рабочее окно, выполнен расчет значений коэффициента проводимости $G_{p.o}$ рабочих окон для ряда значений относительного смещения $\bar{z}$ золотника гидрораспределителя из исходного (нейтрального) положения вплоть до его крайнего положения. Зависимость $G_{p.o}$ от $\bar{z}$ оформлена в виде таблицы. При выполнении расчетов участки между узловыми точками таблицы программно аппроксимируются как линейные.

Для перемещения моталки в составе гидросистемы агрегата АПР-8 используется недифференциальный гидроцилиндр двухстороннего действия с двухсторонним штоком, имеющий диаметр поршня $D_{\text{п}} = 200$ мм, диаметр штока $d_{\text{шт}} = 125$ мм и ход поршня $H = 200$ мм.

При математическом моделировании системы слежения последняя рассматривалась как система с сосредоточенными параметрами [3], работающая при постоянном значении давления рабочей жидкости $p_{\text{пит}} = 6,0$ МПа на входе напорного канала гидрораспределителя, что обеспечивается путем применения в гидросистеме регулируемого насоса, укомплектованного регулятором давления, и пневмогидравлического аккумулятора.

Сжимаемость принималась во внимание только для жидкости, находящейся в рабочих полостях гидроцилиндра привода моталки и присоединенных к ним гидролиниях. При этом учитывалась зависимость модуля объемной упругости рабочей жидкости, содержащей в своем составе нерастворенный газ, от давления. Все металлоконструкции считались недеформируемыми.

Моделирование системы слежения выполнено на основе структурной схемы, представленной на рисунке 5, с использованием программного комплекса ПРАНС-ПК (Проектирование Автоматизированное Неравномерных Систем на Персональном Компьютере) [4].

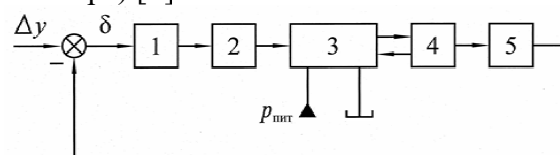


Рисунок 5. Структурная схема системы слежения за кромкой полосы, принятая при моделировании:

- 1 – датчик положения кромки полосы;
- 2 – пропорционально-интегральный регулятор;
- 3 – гидрораспределитель с пропорциональным электрическим управлением;
- 4 – гидроцилиндр привода моталки;
- 5 – подвижная часть моталки

В процессе моделирования решалась задача проверки возможности обеспечения

при использовании гидрораспределителя типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V апериодического процесса отслеживания положения кромки полосы с погрешностью, не превышающей значение $\delta_{\text{доп}} = \pm 0,5 \text{ мм}$, в режиме автоматического управления положением моталки.

При проведении моделирования рассмотрена целесообразность использования в системе слежения программно реализованных пропорционального, пропорционально-интегрального и пропорционально-дифференциального регуляторов.

В результате многовариантного анализа установлено, что при прочих равных условиях наименьшие по абсолютной величине значения погрешности δ слежения при апериодическом характере изменения этой погрешности и, соответственно, апериодическом характере изменения положения золотника регулирующего гидрораспределителя достигаются при использовании пропорционально-интегрального регулятора и введении незначительной перетечки рабочей жидкости между рабочими полостями гидроцилиндра (например, путем соединения этих полостей посредством регулируемого игольчатого дросселя), обеспечивающей необходимый демпфирующий эффект.

Для случая изменения положения Δy кромки полосы в направлении, перпендикулярном по отношению к направлению перемотки рулона, по гармоническому закону (1) определены рациональные значения коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора и коэффициента проводимости дросселя, соединяющего полости гидроцилиндра. Расчетные графики переходных процессов, соответствующие работе системы слежения за кромкой полосы агрегата АПР-8 при использовании в его гидросистеме регулирующего гидрораспределителя типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V и рациональных значений коэффициентов представлены на рисунке 6.

Эксплуатация системы слежения за кромкой полосы агрегата АПР-8 с предложенным для применения регулирующим гидрораспределителем типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V подтвердила результаты моделирования и целесообразность использования гидрораспределителя данного типа в указанной системе. В итоге произведена замена используемых ранее гидрораспределителей на гидрораспределители типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V в гидросистемах целого ряда моталок.

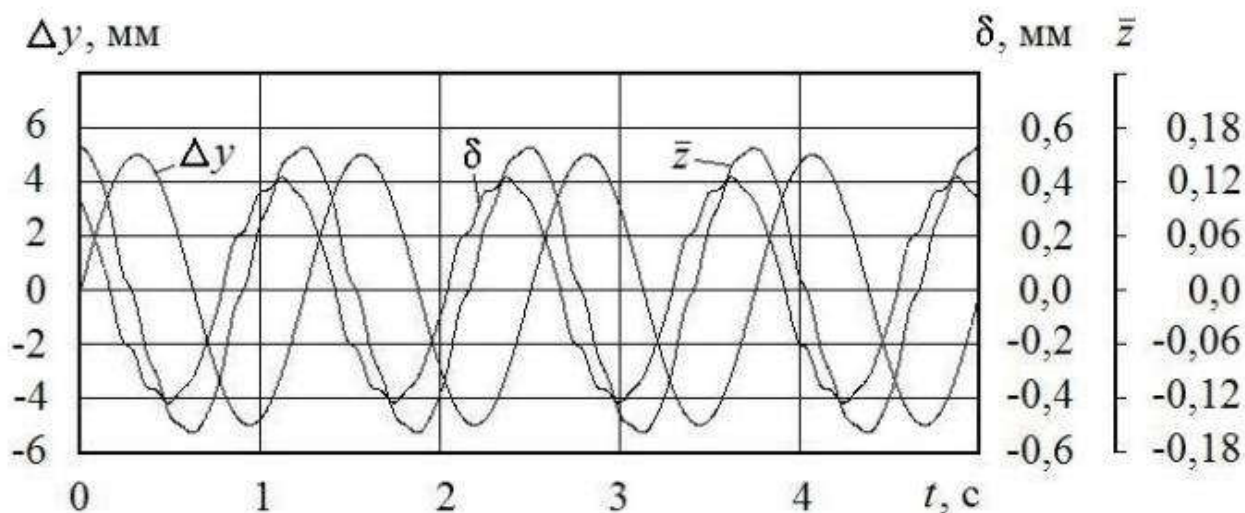


Рисунок 6. Графики изменения во времени положения Δy кромки полосы, погрешности δ слежения и относительного смещения $\bar{z}$ золотника гидрораспределителя относительно его исходного нейтрального положения

Следует отметить, что в настоящее время в ООО «Уральский инжиниринговый центр» открыто производство однокаскадных золотниковых гидрораспределителей

типа CH-SV10 с пропорциональным электрическим управлением (<https://cheltec.ru/product/gidroapparatura-i-agregaty/servoklapan-zolotnikovogo-tipa->

egum/servoklapan-odnokaskadnyy-zolotnikovogo-tipa-egum-10/#char), которые по своим характеристикам не уступают гидрораспределителям типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V.

Заключение

В результате моделирования работы системы слежения за кромкой полосы агрегата АПР-8 при использовании в его гидросистеме регулирующего гидрораспределителя типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V установлена возможность обеспечения аperiodического процесса отслеживания положения кромки с погрешностью, не превышающей значение $\delta_{\text{доп}} = \pm 0,5$ мм, в режиме автоматического управления положением моталки и определены рациональные значения коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора и коэффициента проводимости дросселя, соединяющего полости гидроцилиндра привода моталки.

Эксплуатация системы слежения за кромкой полосы агрегата АПР-8 с предложенным для применения регулирующим гидрораспределителем типа 4WRSE10V80-3X/G24KO/F1V подтвердила результаты

моделирования и целесообразность использования гидрораспределителя данного типа в указанной системе и в гидросистемах целого ряда других моталок.

Библиографический список

1. 4/3 directional high-response control valves, direct operated, with integrated control electronics (OBE). Type 4WRSE. – Rexroth Bosh Group. RE 29067/11.05. – 14 p.
2. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката: Учебник для вузов / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.
3. Гойдо М.Е. Проектирование объемных гидроприводов (Б-ка конструктора). – М.: Машиностроение, 2009. – 304 с.
4. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / И.И. Бажин, Ю.Г. Беренгард, М.М. Гайцгори и др.; Под общ. ред. С.А. Ермакова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.

Information about the paper in English

V.V. Bodrov, R.M. Bagautdinov, M.E. Goydo, S.I. Smyshlyaev
Ural Engineering Centre LLC
Chelyabinsk, Russia
E-mail: goido@cheltec.ru
Receipt date: April 22, 2026

SIMULATION OF THE OPERATION OF THE STRIP EDGE TRACKING SYSTEM FOR A SLITTING MACHINE

Abstract

This article presents a simulation of a strip edge tracking system for a slitting machine. This work was conducted to replace the proportional electric throttling hydraulic distributors previously used in similar systems at VIZ-Stal LLC (Yekaterinburg). In the simulation, the relationship between the change in the position of the hydraulic distributor spool relative to its initial neutral position and the electrical control signal sent from the controller to the electronic control unit of the hydraulic distributor is represented as an oscillatory link, the parameters of which are determined based on the nominal amplitude-frequency characteristic of the hydraulic distributor. Based on the control characteristic of the hydraulic distributor, the conductivity coefficient of its operating windows is calculated for a number of values of the relative displacement of the hydraulic distributor spool from the initial neutral position. This dependence was used in the simulation in tabular form. During the simulation, the parameters of the proportional-integral regulator were determined to meet the requirements for the quality of transient processes and the permissible error of strip edge position tracking in automatic control mode. Operation of the tracking system with the proposed hydraulic distributor confirmed the correctness and advisability of the adopted technical solutions.

Keywords: slitting machine; strip edge tracking system; operational simulation; selection of regulator parameters.
