

на составляющие звенья и, в конечном счете, повысит долговечность всего перфоратора. Расчет суммарных допусков размеров и торцевых биений производился вероятностным методом.

Выводы. Таким образом, учет наиболее значимых величин, износа, торцевых биений и деформаций, влияющих на размеры в линейных размерных цепях изделий, нагруженных ударным импульсом, позволит уже на стадии проектирования обеспечить более высокую долговечность изделий.

Список литературы

1. Бегаоев И.А., Бойко А.И. Повышение точности и долговечности бурильных машин. – М.: Недра, 1986. -213 с.
 2. Дунаев П.Ф., Леликов А.П. Расчет допусков размеров. – М.: Машиностроение, 1981. – 189 с.
 3. Артамонова Д.А. Исследование точности сопряжений переносных перфораторов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Кривой Рог, 1995.
 4. Артамонова Д.А. Расчет отклонений от расположения поверхностей. Сб. материалов Всероссийской конференции-семинаре. Сызрань, СГТУ. – 2011.
 5. Артамонова Д.А., Котляр Д.А. Определение точности сопряжений телескопного перфоратора. Вісник КТУ. Зб. Наукових праць. Вип.22. 2008р. с.126-129.
 6. Артамонова Д.А., Нечаев В.П., Касир С.Г., Кисильов В.В. Некоторые направления повышения долговечности переносных перфораторов. Вісник КТУ. Зб. Наукових праць. Вип.30. 2012-с.139-141.
 7. Laura Wakeford. How Your Design Can Affect The Cost, Quality And Time Required To Manufacture Parts. MCADVision Magazine - July 2001 - Part1.
 8. О.Н. Калачев, Н.В. Богоявленский, С.А. Погорелов Графическое моделирование размерной структуры технологического процесса на электронном чертеже в среде AutoCAD// Вестник компьютерных и информационных технологий. М.: - 2012. - №5.– С.13-19
- Рукопись поступила в редакцию 14.04.15

УДК 621.316.765:621.314.632

В.Г. ФАЙНШТЕЙН, канд. техн. наук, доц., А.В. ПИРОЖЕНКО, канд. техн. наук,
КМИ ДВНЗ Криворожский национальный университет

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ НАВЫКОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Существующая практическая подготовка специалистов в области электропривода признана как недостаточная, не позволяющая им самостоятельно проводить комплекс наладочных работ или работ по устранению отказов. Все известные виртуальные методы исследования электроприводов масштабируются во времени, поэтому у обучающихся не развиваются навыки по использованию измерительных и регистрирующих приборов при работе на реальной установке, а также навыки по работе с реальными узлами систем управления для настройки заданных режимов привода. Предложен стенд, состоящий из реальной системы регулирования и модели силовой части привода, работающей без масштаба времени, что позволило значительно приблизить лабораторную установку к реальному приводу. Детально рассмотрена структура лабораторного стенда на базе двигателя постоянного тока независимого возбуждения с реверсивным тиристорным преобразователем. Доказано, что оптимальным алгоритмом моделирования трехфазного мостового преобразователя, работающего на якорную цепь, является алгоритм, который по номеру включаемого тиристора и состоянию остальных тиристорov позволяет выбрать расчетную схему и выполнить интегрирование уравнений, описывающих электрические процессы в схеме, определить момент изменения состояния тиристорov и переход к другой расчетной схеме. Приведены дискретные модели и рассмотрены расчетные схемы трехфазного мостового преобразователя в нормальном режиме коммутации тиристорov и аварийном режиме при ложном включении тиристора во время коммутации. Математический аппарат модели - решение дифференциальных уравнений методом численного интегрирования Рунге-Кутты. Предложено аппаратное обеспечение математической модели на базе микро-ЭВМ семейства ARM Cortex™ четвертого поколения.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Подготовка специалистов в области электропривода в высших учебных заведениях последние годы в основном сводилась к теоретической части. Практическая подготовка ограничивалась выполнением типовых лабораторных работ, при этом в силу известных обстоятельств (дороговизна стендов, ограничения, связанные с техникой безопасности, ограничения по мощности привода и т.д.) студенты самостоятельно не могут провести комплекс наладочных работ или работ по устранению отказов. Кроме того, практическая подготовка специалистов должна обеспечить многообразие задач, например, умение проводить наладку систем управления для приводов с двигателями различной мощности, различного характера нагрузки и т.п. При этом необходимо обеспечить минимальные капитальные и эксплуатационные затраты, связанные с созданием лабораторного стенда.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время широко используются виртуальные методы исследования электроприводов, которые обеспечивают многообразие задач, относительно низкие капитальные затраты и не требуют специальных мероприятий для обеспечения безопасности выполнения лабораторных работ [1-6]. Но, так как известные методы исследования электроприводов масштабируются во времени, то у обучающихся не развиваются навыки по использованию измерительных и регистрирующих приборов при работе на реальной установке, а также навыки по работе с реальными узлами систем управления для настройки заданных режимов работы привода. Таким образом, существующие подходы в создании лабораторного стенда для подготовки специалистов в области электропривода, использующие моделирующие установки, работающие в масштабе времени, не позволят решать поставленные задачи.

Постановка задачи. Создание лабораторного стенда для обучения методам наладки и устранения отказов систем управления электроприводом, состоящего из реальной системы регулирования и модели силовой части привода, работающего без масштаба времени.

Изложение материала и результаты. Если рассмотреть лабораторную установку, состоящую из реальной системы управления и модели силовой части (преобразовательной установки и электродвигателя), работающей без масштаба времени, то получим значительное приближение лабораторной установки к реальному приводу. Структурная схема такой установки приведена на рис. 1.

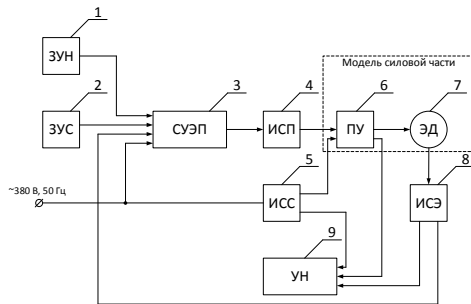


Рис. 1. Лабораторная установка, состоящая из реальной системы управления и модели силовой части: 1 - задающее устройство нагрузки на валу двигателя (ЗУН); 2 - задающее устройство скорости вращения вала двигателя (положения вала) (ЗУС); 3 - система управления электроприводом (СУЭП); 4 - интерфейс преобразования сигналов выхода СУЭП в дискретные входные сигналы микроконтроллера (ИСП); 5 - интерфейс преобразования трехфазного напряжения питающей сети в аналоговые входные сигналы микроконтроллера (ИСС); 6 - модель преобразовательной установки (ПУ); 7 - модель электродвигателя (ЭД); 8 - преобразователь цифровых сигналов

ЭД в соответствующие напряжения и токи для организации обратных связей СУЭП и подключения измерительных приборов (ИСЭ); 9 - УН - приборы для измерения тока (амперметры), напряжения (вольтметры) или клеммы для подключения устройств наблюдения

Из-за ограниченного объема статьи рассмотрены только вопросы создания лабораторного стенда для обучения методам настройки и ремонта систем управления электроприводом на базе двигателя постоянного тока независимого возбуждения с реверсивным тиристорным преобразователем. В этом случае ЗУН и ЗУС - потенциометрические, сельсинные и т.п. датчики установленного значения скорости (момента нагрузки) или программируемые устройства для задания диаграмм скорости, положения и нагрузки. СУЭП - например, аналоговая система управления ЭТАЛ ЭТУ 200 или цифровая система «DC MASTER» фирмы Сименс, выходом этих и других систем управления являются импульсные сигналы включения тиристоры. Поэтому ИСП содержит элементы преобразования уровня сигналов и их гальваническую развязку. ПУ - модель реверсивного тиристорного преобразователя для питания якоря двигателя и нереверсивного преобразователя для питания обмотки возбуждения. ЭД - модель электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения. Все модели должны работать в реальном масштабе времени. ИСЭ - совокупность цифро-аналоговых преобразователей цифровых значений токов и напряжений тиристоры, обмоток электродвигателей и скорости, положения вала двигателя, вычисленных моделями, а также преобразователь цифрового значения положения вала двигателя в последовательность импульсов, аналогичную сигналам инкрементного датчика положения. ИСС - это гальваническая развязка с делителем напряжения и быстродействующие аналого-цифровые преобразователи.

Модель механической части электропривода целесообразно выполнить на отдельном микроконтроллере, где по скорости (положению вала электродвигателя) и известным механическим характеристикам элементов кинематической схемы, определяется момент нагрузки на валу двигателя, а его момент - по току якоря и потоку возбуждения. Момент электродвигателя является управляющим воздействием модели механической части привода, а момент нагрузки - возмущающим воздействием модели электрической части. Этот вопрос достаточно изучен и его реализация не содержит проблем.

Электрическая часть модели электродвигателя стандартная, без учета реакции якоря и при предположении, что число пазов бесконечно большое, т.е. якорная цепь двигателя и цепь возбуждения описываются линейным дифференциальным уравнением первого порядка, с учетом нелинейной зависимости противо-ЭДС двигателя от тока возбуждения. Модель якорной цепи двигателя, как правило, совмещена с моделью преобразователя.

Основная проблема, возникающая при создании подобных стендов, это ограниченное быстродействие микроконтроллера для реализации модели, работающей в реальном времени. Для оценки необходимого быстродействия микроконтроллера рассмотрим алгоритм работы моделей преобразователей и двигателей постоянного тока, который целесообразен для создания указанного стенда. Модели электропривода постоянного тока с реверсивным тиристорным преобразователем известны и широко используются для проектирования тиристорных преобразователей [7,8] и для виртуальных моделей электроприводов постоянного тока. В первом случае они объёмные, так как содержат модели полупроводниковых приборов, во втором случае обычно модели упрощенные, поскольку пренебрегают процессами коммутации и не проверяются условия выключения тиристоров. В нашем случае нет необходимости рассматривать переходные процессы в тиристорах, достаточно считать, что:

включение тиристора происходит мгновенно при наличии условий его включения (положительный фронт импульса на управляющем электроде тиристора и положительное значение напряжения анод- катод тиристора);

выключение тиристора происходит при заданном, для данной модели тиристора, обратном токе через него.

Для получения аварийных режимов работы преобразователя необходимо, чтобы модель преобразователя учитывала коммутационные процессы при включении (выключении) тиристора, и содержала контроль напряжения на тиристорах. Используются два подхода при разработке алгоритмов моделирования трехфазных мостовых преобразователей, работающих на якорную цепь двигателя:

по номеру тиристора, на который подается импульс включения и состоянию остальных тиристоров (включен/выключен) выбирается расчетная схема и выполняется интегрирование уравнений, описывающих электрические процессы в схеме, далее определяется момент изменения состояния тиристоров и переход к другой расчетной схеме, причем во включенном состоянии сопротивление тиристора равно нулю, в выключенном – бесконечность;

ведется расчет токов и напряжений во всех ветвях схемы, при этом тиристор заменяется двухполюсником, параметры которого изменяются в зависимости от состояния тиристора.

Например, если рассматривать режимы преобразователя: а) нормальный режим выпрямления, б) коммутация тиристоров и в) аварийный режим при ложном включении тиристора во время коммутации, то получим три расчетные схемы, приведенные на рис. 2.

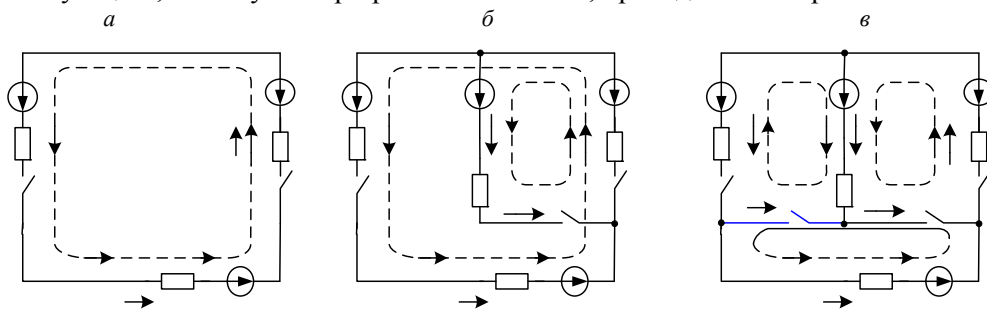


Рис. 2. Расчетные схемы трехфазного мостового преобразователя

Источники ЭДС в расчетных схемах, номер контролируемого тока для определения момента отключения тиристоров, знак противо-ЭДС двигателя (z_{ne}), зависят от номеров работающих и включаемых тиристоров, как показано в табл. 1. Нумерация тиристоров в таблице $k=1-6$ соответствует очередности их включения во времени, тиристор с номером 1 установлен в катодной группе фазы А. В расчетных схемах

$$i = \begin{cases} i = k & \text{если } (1 \leq i) \cap (i \leq 6) \\ i = k - 6 & \text{если } i > 6 \end{cases},$$

где $i+2$ - включаемый тиристор; $i+3,4,5$ - ложно включаемые тиристоры.

Таблица 1

Характеристики работы тиристоров 3-х фазного мостового преобразователя

Коммутация в группе	Работающие тиристоры	Включенные тиристоры	Источники			i	i+1	I+2	Знак Ed zne
			E1	E2	E3				
Катодной	1,2	3	Ua	Ub	Uc	1	2	3	+
	3,4	5	Ub	Uc	Ua	3	4	5	+
	5,6	1	Uc	Ua	Ub	5	6	1	+
Анодной	6,1	2	Ub	Uc	Ua	6	1	2	-
	2,3	4	Uc	Ua	Ub	4	3	4	-
	4,5	6	Ua	Ub	Uc	2	5	6	-

Очередность включения тиристоров определяется аппаратно реализованной системой управления тиристорным преобразователем и электропривода в нормальном режиме. Аварийный режим тиристоров может принудительно задаваться программой управления моделью в зависимости от задачи исследований электропривода. Программа модели определяет номер расчетной схемы, после чего включается подпрограмма решения соответствующих этой схеме дифференциальных уравнений.

Точность решения определяется шагом интегрирования уравнений Δt . Таким образом, основное влияние на погрешности метода моделирования окажет время решения разностных уравнений.

Упрощенная схема алгоритма работы модели показана на рис. 3.

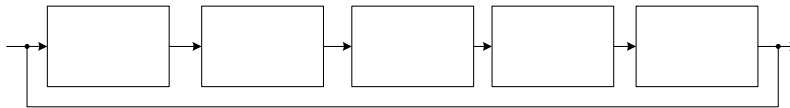


Рис. 3. Упрощенная схема цикла алгоритма в течение шага интегрирования

Основное время расчеты ведутся по схеме рис. 2а, в период коммутации расчеты ведутся по схеме рис. 2б, причем время коммутации для трехфазного мостового преобразователя составляет примерно 3-4 % от длительности интервала преобразования. Несмотря на последнее обстоятельство, следует выбирать шаг интегрирования исходя из необходимости решения двух дифференциальных уравнений, составленных по методу контурных токов для электрической части привода, дифференциального уравнения для механической части привода и определения по заранее заданному логическому уравнению значений ЭДС в уравнениях для якорной цепи двигателя.

Коэффициенты уравнений – положительные числа, постоянные для привода, их определяют в части программы подготовки к решению. При использовании микро-ЭВМ, вычисляющих в формате с фиксированной запятой, рассчитываются с учетом масштабов токов и напряжения. Для моделирования преобразователя с двигателем по второму способу воспользуемся методами расчета электрических цепей на ПК, рассмотренными в [9]. Для расчета методом узловых потенциалов дискретная модель цепи га–Ла дана на рис.4а, а цепи гd–Ld на рис. 4б, дискретная модель схемы нереверсивный преобразователь-двигатель показана на рис. 4в. На рисунке га – анодная цепь тиристоров, гd – якорная цепь двигателя, gt – двухполюсник замещения тиристора (в нашем случае проводимость).

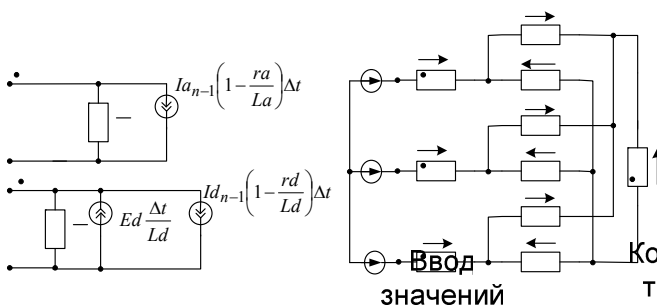


Рис. 4 Дискретные модели двухполюсников R-L и расчетная схема

Величина проводимостей $gt1...gt6$ изменяется скачком по сигналам управления тиристорами, поступающими из системы управления. В этом случае необходимо решить пять уравнений, составленных по методу узловых потенциалов для электрической части и одно уравнение для механической части. Если сравнить два варианта, то второй способ требует увеличенных затрат на время вычислений, и соответственно увеличения шага интегрирования.

С точки зрения исследования систем управления электроприводом рассмотренные упрощенные способы моделирования якорной цепи равнозначны. Затраты времени на определение токов тиристоров и якорного тока при расчетах по первому способу значительно меньше.

С точки зрения исследования систем управления электроприводом рассмотренные упрощенные способы моделирования якорной цепи равнозначны. Затраты времени на определение токов тиристоров и якорного тока при расчетах по первому способу значительно меньше.

Поэтому далее остановимся на первом способе моделирования для оценки уровня дискретизации процесса по времени.

Математический аппарат модели: решение дифференциальных уравнений методом численного интегрирования Рунге-Кутты, обеспечивающий достаточную точность вычисления. Вычисления производятся над 64-х битными числами в формате плавающей запятой. Напряжения питающей сети вводится с помощью встроенных в микро-ЭВМ АЦП, причем для обеспечения безопасности напряжение подается через понижающие трансформаторы. В аналоговом виде выдаются токи тиристоров, якорный ток двигателя и скорость вращения вала двигателя.

Аппаратное обеспечение математической модели представляет собой микро-ЭВМ семейства ARM Cortex™ 4 поколения [10], как технология, получившая наибольшее распространение в последнее время. Фирма производитель микро-ЭВМ выбрана из расчетов наиболее быстродействующего кристалла, представленного в линейке указанной технологии - ST Microelectronics. Данная микро-ЭВМ содержит в составе периферийных средств аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с разрешающей способностью 12 бит, а так же цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) такого же разрешения. Быстродействие АЦП микро-ЭВМ при заданной точности вычисления составляет 5 мкс. Реализованный алгоритм вычисления параметров электрической машины по методу Рунге-Кутты, при выдаче синхроимпульсов, показал частоту 19,6 КГц, что соответствует 50 мкс на такт вычисления (интервал повторений вычислений). Указанный результат не является конечным, в виду того, что частота генератора ядра микро-ЭВМ соответствовала 48 МГц при 168 МГц возможных для данной серии. Таким образом, частота дискретизации процессов при управлении в реальном масштабе времени близка к частоте дискретизации процессов при использовании стандартных виртуальных моделей двигателей.

Моделирование цепи возбуждения не вызывает вопросов в связи с большими постоянными времени и выполняется по первому способу без учета процессов коммутации тиристоров. С целью экономии времени модель цепи возбуждения выполняется на отдельной микро-ЭВМ, работающей с фиксированной запятой.

В систему стенда целесообразно включить также узел нагрузки и задавать различные варианты нагрузки, зависящие от скорости вращения и положения вала двигателя, моделировать упругость соединительных валов, погрешности зубчатых передач и т.п. [11]. Для этой цели необходима дополнительная микро-ЭВМ, в связи с достаточно большим объемом вычислительных задач. Все микро-ЭВМ связаны между собой синхронной системой передачи данных, что не вызовет увеличение длительности интервала дискретизации.

Выводы и направление дальнейших исследований. Использование предлагаемого принципа организации лабораторных работ позволяет студенту при малых капитальных затратах:

учиться работать с реальными системами управления, осваивать приемы наладки и определения отказов;

исследовать широкий спектр задач для различной мощности привода, различного характера нагрузок;

исследовать системы взаимосвязанного электропривода.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на приближение модели механической части электропривода к реальным условиям, в частности учета наличия в ней зазоров, нелинейных передающих устройств и т.п. Моделирование зазоров и нелинейных передаточных устройств значительно увеличивают объем вычислений, что потребует создания многоконтроллерных систем и разработки для них методов моделирования в реальном масштабе времени.

Список литературы

1. **Чорний О.П., Луговой А.В., Родькин Д.Й., Сисюк В.Ю., Садовой А.В.** Моделивання електромеханічних систем, підручник для вузів, Кременчук, 2001, 374с.
2. **Ещин Е.К.** Моделирование электромеханических процессов многодвигательных электроприводов горных машин. – Кемерово: Кузбасский гос.техн.ун-т, 1999. –115 с.
3. **Терехин В.Б.** Моделирование систем электропривода в Simulink (MatLab 7.0.1).Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - 320 с.
4. **Шрейнер Р.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты DJVU DOC. Екатеринбург: УРО РАН, 2000 , 654 с.
5. Патент РФ № 2442995 G 01 R 31/34. Стенд с электромагнитным нагрузочным модулем для исследования и испытания электроприводов. /**А.И. Некрасов, А.В. Ефимов, А.А. Некрасов, Н.Н. Серых, В.З. Грубников**, опубл. 12.10.2012.

6. Патент РФ № 24473921, G 01 R 31/34. Учебно-лабораторный стенд для изучения электрических машин и электроприводов. / Ю.С. Ройтбург, А.А. Сесин, Ю.П. Долгов, А.А. Прентсель, опубл. 27.01.2013.
7. Д. Н. Аминова, В. С. Мухамеджанов, В. П. Смирнов, М. Р. Халилова. Метод моделирования и библиотека моделей элементов схем вентиляльных преобразователей для АЦВК. Сборник Автоматизированный электропривод, Москва, Энергоатомиздат, 1983, 351с.
8. Кузьмин В.А., Мустафа Г.М., Миносян В.Л. Моделирование переходного процесса включения тиристора на АВМ. Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. 1978, вып. 3. - С. 6-13.
9. Нерретер В. Расчет электрических цепей на персональной ЭВМ, Москва, Энергоатомиздат, 1991. - 230 с.
10. Ю. Джозеф. Ядро Cortex-M3 компании ARM. Полное руководство. Серия «Мировая электроника». Издательский дом «Додека - XXI», Москва, 2012. - 552 с.
11. Иванушкин В.А. и др., Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов / В.А. Иванушкин, В. Н. Сарапулов, П. Шымчак: Щецин, 2000. - 310 с.

Рукопись поступила в редакцию 14.04.15

УДК 622.788: 005.591.6

Ю.С. РУДЬ, д-р техн. наук, проф., В.Г. КУЧЕР, канд. техн. наук,
В.Ю. БЕЛОНОЖКО, ст. преподаватель, Криворожский национальный университет

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВЛАЖНОСТИ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ

Цель работы - исследование возмущающих факторов, снижающих эффективность работы системы автоматической стабилизации влажности шихты (САОВ), и разработка рекомендаций, направленных на уменьшение их вредного воздействия.

По мнению авторов работы наиболее перспективной САОВ шихты является система, предложенная коллективом Ново-Криворожского ГОКа. Рассматриваемая система реализует способ спекания шихты, особенность которого состоит в том, что при автоматическом регулировании законченности процесса спекания шихты одновременно регулируется ее влажность. При этом в качестве задающего импульса принимается скорость движения тележек агломерационной машины. Агломератчик вручную выбирает подачу необходимого количества воды для увлажнения шихты, которое связано с текущим содержанием в ней возврата, и включает в работу системы автоматической стабилизации высоты слоя шихты и температурно-теплового режима зажигания. После выхода на установившийся режим работы, когда текущие фактические параметры заданных величин соответствуют заданным значениям, включается работу система автоматической оптимизации влажности шихты САОВ.

В развитие этой системы предложена новая система автоматической оптимизации влажности агломерационной шихты (САОВ), в которой осуществляется коррекция задания регулятору по содержанию в шихте возврата. При этом достигается минимизация продолжительности процесса спекания шихты за счет изменения скорости движения агломерационной ленты, осуществляемой после стабилизации места окончания процесса спекания.

Использование предлагаемой авторами системы автоматической оптимизации влажности шихты САОВ позволяет обеспечить оптимальные условия для процесса спекания агломерата и за счет этого увеличить производительность агломерационных машин.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Получение агломерата высокого качества и обеспечение максимальной производительности агломерационной машины возможно лишь при использовании в производстве систем автоматического регулирования процесса спекания. Одним из перспективных направлений автоматизации процесса спекания шихты является использование систем оптимизации ее влажности (СОАВ).

Для увеличения газопроницаемости шихты, непосредственно влияющей на скорость спекания и производительность агломерационной машины, шихту увлажняют и подвергают обработке в смесителях и окомкователях. Зависимость газопроницаемости шихты от ее влажности имеет экстремальный характер, поэтому как недостаточная влажность шихты, так и избыток влаги в ней не желательны.

Для контроля влажности шихты используют разные методы: кондуктометрический, основанный на измерении электрической проводимости увлажненной шихты; тепловой, основанный на измерении теплопроводности шихты; нейтронный, основанный на контроле замедления быстрых нейтронов атомами водорода и др.

Если известна исходная влажность шихты и ее заданное значение, то количество воды, необходимое для доувлажнения шихты до заданного уровня, изменяется пропорционально расходу шихты и разности между заданным и исходным значениями ее влажности. Заданное значе-