

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
ВК «Кузбасская ярмарка»

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 9 - 2023

Главный редактор
д.т.н., проф. Фрянов В.Н.

Редакционная коллегия:
чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Клишин В.И., д.т.н., проф. Никитенко С.М.,
д.т.н. Павлова Л.Д. (технический редактор), д.т.н., проф. Домрачев А.Н.,
д.э.н., проф. Петрова Т.В.

Н 340 Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов : науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2023. - № 9. – 390 с.

Рассмотрены аспекты развития инновационных наукоемких технологий диверсификации угольного производства и обобщены результаты научных исследований, в том числе создание роботизированных и автоматизированных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, базирующиеся на использовании прорывных технологий добычи угля и метана, комплексной переработке этих продуктов в угледобывающих регионах и реализации энергетической продукции потребителям в виде тепловой и электрической энергии.

Журнал предназначен для научных и научно-технических работников, специалистов угольной промышленности, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

Номер подготовлен на основе материалов Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 6-9 июня 2023 г.).

Основан в 2015 г.
Выходит 1 раз в год

Учредитель - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УДК 622.2
ББК 33.1

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМЫ 1С: ДОКУМЕНТООБОРОТ И СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ЗАЯВОК NAUMEN SERVICE DESK.....	253
Матюшкин Г.В., д.т.н. Кулаков С.М.	253
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	253
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА И ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА T-ENERGY	258
к.т.н. Сеченов П.А., д.т.н. Рыбенко И.А.	258
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	258
МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ СКИПОВОГО ПОДЪЕМА ЦР6х3,2/0,75 АБАКАНСКОГО РУДНИКА	261
д.т.н. Островляничик В.Ю., к.т.н. Кубарев В.А., Маршев Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю.....	261
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	261
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ И ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ.....	267
д.т.н. Островляничик В.Ю., к.т.н. Кубарев В.А., Маршев Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю.....	267
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	267
ИЗМЕРЕНИЕ ДВИЖУЩЕГО МОМЕНТА И МАССЫ ГРУЗА В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ДВУХСКИПОВОЙ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ..	272
к.т.н. Поползин И.Ю.	272
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	272
О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЕЛИЧИНАМ ПРИВОДА С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАНАТАХ	276
к.т.н. Кипервассер М.В., к. ф.-м.н., Хаимзон Б.Б., к.т.н. Симаков В.П.	276
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	276
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATHLAB/SIMULINK ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	280
Стищенко К.П., к.т.н. Кипервассер М.В.	280
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	280
ПРОБЛЕМЫ ВЛИЯНИЯ МОЩНОЙ РЕГУЛИРУЕМОЙ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ 0,4 кВ.....	286
Бедарев М.А., Коновалов О.В., Мамонтов Д.Н., к.т.н. Кипервассер М.В.....	286
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	286
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ УГОЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СТРАНАХ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ.....	291
^{1,2} д.т.н. Зеньков И. В., ³ Мулюшкина А.А.	291
1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия	291
2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия.....	291
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия	291
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА	294
к.т.н. Кузнецова Е.С., Усова Э.А., Комарова О.В., Качурин А.С.	294
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк.....	294
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ.....	298
¹ к.т.н. Кузнецова Е.С., ² Кузьмина С.Ю., ³ Кузьмин С.А.....	298

Список литературы

1. Сеченов П.А., Рыбенко И.А. Исследование реакций горения угольного топлива с использованием компьютерной программы T-Energy // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 238-240.
2. Сеченов П.А., Рыбенко И.А. Численный метод и математическая модель нахождения равновесного состава термодинамической системы программного комплекса T-Energy // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – Т. 49. – № 4. – С. 104-112.
3. Белов Г.В., Трусков Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с.
4. FactSage thermochemical software and databases / G.W. Bale, E. Bélisle, P. Chartrand [et al.] // Calphad. – 2016. – Vol. 55. – Part 1. – P. 1–19.
5. Казаков А.А., Рябошук С.В. Основы металлургической экспертизы. Численное моделирование фазовых превращений в жидкой и затвердевающей стали: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 110 с.
6. Thermo-Calc and DICTRA enhanced materials design and processing / P. Shi, A. Engström, L. Höglund [et al.] : conference «Materials Science Forum». – 2005. – P. 475–479.
7. Агеев Н.Г., Набойченко С.С. Металлургические расчеты с использованием пакета прикладных программ HSC Chemistry : учеб. пособ.. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 124 с.

УДК 621.3.078:62-83: 622.6

**МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
СКИПОВОГО ПОДЪЕМА ЦР6х3,2/0,75 АБАКАНСКОГО РУДНИКА****д.т.н. Островляничик В.Ю., к.т.н. Кубарев В.А., Маршев Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия**

Аннотация. В статье проведен анализ существующей аналоговой системы управления электроприводом скипового подъема и предложена методика получения цифровой вычислительной модели для целей автоматического управления приводом.

Ключевые слова: шахтный подъем, подъемная установка, электропривод, система управления электроприводом, цифровая система управления.

Подъемные установки (ПУ) большой мощности выше 1,5 тыс. кВт выполняют с электроприводом постоянного тока или синхронных электродвигателей. Эксплуатируемые ПУ выполнены с применением аналоговых управляющих устройств и устарели морально и физически. Кроме того, современные цифровые системы управления (ЦСУ) имеют ряд существенных преимуществ.

Реализация ЦСУ связана с рядом проблем, связанным с особенностями. В рабочей технической документации согласно единым правилам безопасности (ЕПБ) и правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [1,2] подъемные установки должны иметь принципиальные схемы. В цифровых системах это техническая структура, которая представляет из себя совокупность технических элементов управляющего устройства, объединенных в структуру, т.е. устанавливается взаимосвязь. Поэтому вместо принципиальной схемы могут быть представлены техническая и алгоритмическая структуры, составленная на основе математической модели.

Можно сформулировать следующую цель работы. На основании анализа действующей аналоговой системы управления составить математическую модель объекта управления, вычислительную модель и вычислительную модель управляющего устройства в

реальном времени для реализации на контроллере. Для выполнения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Составить математическую модель системы автоматического регулирования скорости (САРС) и алгоритмическую структуру, позволяющие проводить исследования в реальном времени с применением контроллеров при реализации цифровых систем управления.
2. Получить и реализовать вычислительную модель САРС, позволяющую не только реализовать, но и произвести наладку САРС.
3. Получить вычислительную модель управляющего устройства на том же языке программируемого контроллера, которая является базовой основной при составлении программы.

Объект управления включает в себя:

- подъемный двигатель типа ПБК-380-80, который описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{я}} = U_{\text{я}} - E, \\ I_{\text{я}} = \Delta U_{\text{я}} \frac{1/R_{\text{э}}}{T_{\text{я}} p + 1}, \\ I_{\text{дин}} = I_{\text{я}} - I_{\text{с}}, \\ \omega = I_{\text{дин}} \frac{k_E/R_{\text{э}}}{T_{\text{мп}}}, \\ E = k_E \omega. \end{cases} \quad (1)$$

где $U_{я}$ – напряжение на якоре двигателя; $\Delta U_{я}$ – падение напряжения на якоре двигателя; E – противо-ЭДС двигателя; $I_{я}$ – ток якорной цепи привода; $I_{дин}$ – динамический ток; ω – угловая скорость вращения якоря двигателя; k_E – коэффициент внутренней обратной связи по ЭДС двигателя; T_m – механическая постоянная времени двигателя; $T_{я}$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи;

- генератор типа ГП-2200-750, который описывается следующим уравнением:

$$U_{\Gamma} = U_{\text{Br}} \frac{k_{\Gamma}}{T_{\Gamma} p + 1}, \quad (2)$$

где U_{6z} – напряжение возбуждения генератора; U_z – напряжение генератора; k_z – коэффициент передачи генератора; T_z – постоянная времени цепи возбуждения генератора;

- тиристорный возбудитель генератора типа КТЭ с цифровой системой импульсно-фазового управления (СИФУ). Передаточная функция возбудителя:

$$W_{\text{TP}}(p) = \frac{k_{\text{TP}}}{T_{\text{TP}}n+1}, \quad (3)$$

где $k_{ТП}$ – коэффициент передачи возбудителя, $T_{ТП}$ – постоянная времени пробразователя.

САРС выполнена двухконтурной с регулятором ЭДС, внутренним контуром напряжения и задатчиком интенсивности с выполненным в нем токоограничением [3]. Такой САРС с учетом передаточных функций объекта управления (1-3) и [3] соответствует следующая система уравнения (4).

Учитывая [3], алгоритмическая структура САРС может быть представлена в виде, показанном на рис. 1.

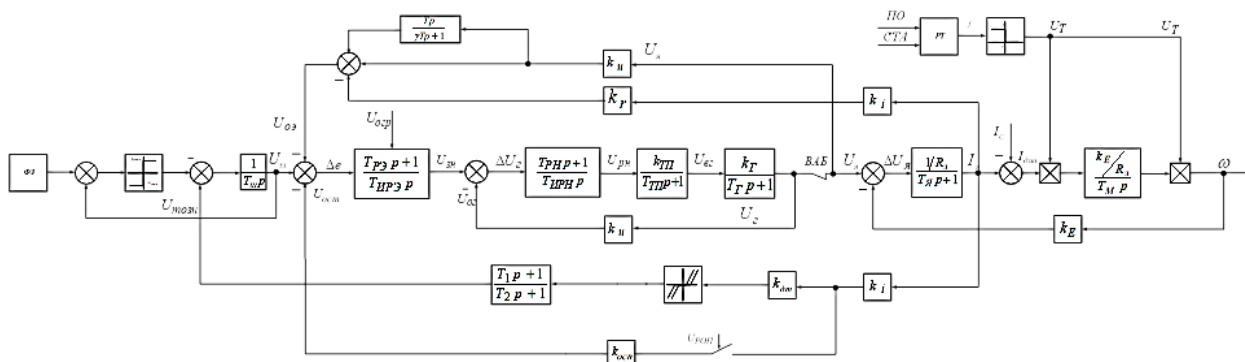


Рис. 1. Алгоритмическая структура аналоговой САРС электропривода скипового подъема

Вычислительную модель построим путем представления системы уравнений, состоящей из трех элементарных звеньев – идеального интегрирующего $y = \frac{k}{Tp} x$; суммирующего $x_1 \pm x_2 = x$; и масштабного $y = kx$. В этом случае операция интегрирования представляется в виде суммирования текущего и предыдущего значений $y = k\Delta t_i + y_{i-1}$; $y_{i-1} = k\Delta t_{i-1}$, т.е. дифференциальные уравнения решаются как система алгебраических уравнений (4) с аргументом Δt , т.е. получаем переходные процессы для выходной величины:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{зэ} = (U_{зс} - U_{този}) \frac{1}{T_{зи}p}, \\ \Delta e = U_{зэ} - U_{оэ} - U_{ост}, \\ U_{зн} = \Delta e \frac{T_{рэ}p+1}{T_{ирэ}p}, \\ \Delta U_{г} = U_{зн} - U_{ог}, \\ U_{рн} = \Delta U_{г} \frac{T_{рн}p+1}{T_{ирн}p}, \\ U_{вг} = U_{рн} \frac{k_{тп}}{T_{тп}p+1}, \\ U_{г} = U_{вг} \frac{k_{г}}{T_{г}p+1}, \\ U_{я} = U_{г}, \\ \Delta U_{я} = U_{я} - E, \\ I_{я} = \Delta U_{я} \frac{1/R_{э}}{T_{я}p+1}, \\ I_{дин} = I_{я} - I_{с}, \\ \omega = U_{т} I_{дин} \frac{k_E/R_{э}}{T_{мп}}, \\ E = k_E \omega, \\ U_{т} = \begin{cases} 0, & \text{тормоз наложен,} \\ 1, & \text{тормоз снят.} \end{cases}, \\ U_{ог} = k_u U_{г}, \\ U_{оэ} = k_u U_{я} + k_u U_{г} \frac{T_p}{\gamma T_p+1} - k_r k_{i} I_{я}, \\ U_{ост} = k_i k_{ост} I_{я}, \\ U_{този} = k_i k_{дт} I_{я} \frac{T_1 p+1}{T_2 p+1}. \end{array} \right. \quad (4)$$

В системе (4) приняты следующие обозначения: где $U_{зэ}$ – напряжение задания ЭДС; $U_{зс}$ – напряжение задания скорости; $U_{този}$ – напряжение токоограничения в задатчике интенсивности; Δe – сигнал рассогласования ЭДС; $U_{оэ}$ – напряжение обратной связи по ЭДС двигателя; $U_{ост}$ – напряжение жесткой обратной связи по току якоря; $U_{зн}$ – напряжение задания напряжения генератора; $\Delta U_{г}$ – сигнал рассогласования напряжения генератора; $U_{ог}$ – напряжение обратной связи по напряжению генератора; $U_{рн}$ – напряжение на выходе регулятора напряжения; $U_{вг}$ – напряжение возбуждения генератора; $U_{г}$ – напряжение генератора; $U_{я}$ – напряжение на якоре двигателя; $\Delta U_{я}$ – падение напряжения на якоре двигателя; E – противо-ЭДС двигателя; $I_{я}$ – ток якорной цепи привода; $I_{дин}$ – динамический ток; ω – угловая скорость вращения якоря двигателя; k_E – коэффициент внутренней обратной связи по ЭДС двигателя; $U_{т}$ – сигнал наложения электромагнитного тормоза; k_u – коэффициент обратной связи по напряжению; k_r – коэффициент обратной связи по току двигателя в датчике ЭДС; k_i – коэффициент обратной связи по току якорной цепи; $k_{ост}$ – коэффициент жесткой обратной связи по току; $k_{дт}$ – коэффициент токоограничения в задатчике; $T_{зи}$ – постоянная времени задатчика интенсивности; $T_{рэ}$ – постоянная времени регулятора ЭДС; $T_{ирэ}$ – постоянная времени интегрирования регулятора ЭДС; $T_{рн}$ – постоянная времени регулятора напряжения; $T_{ирн}$ – постоянная времени интегрирования регулятора напряжения; T – постоянная времени в датчике ЭДС; γ – коэффициент в датчике ЭДС; $k_{тп}$ – коэффициент усиления

возбудителя; T_{mn} – постоянная времени возбудителя; k_e – коэффициент передачи генератора; T_e – постоянная времени цепи возбуждения генератора; R_e – активное сопротивление якорной цепи двигателя; T_a – постоянная времени якоря; T_m – механическая постоянная времени.

Очевидно, что точность при этом зависит от Δt . В [3] показано, что при $\Delta t = (5 \div 10)T_\mu$, где T_μ – минимальная постоянная времени в системе управления. Систему управления при этом можно считать непрерывной и к ней применимы все методы анализа и синтеза непрерывных линейных систем управления. Это открывает широкие перспективы использования данного метода при анализе, синтезе и реализации цифровых систем управления.

Построим вычислительную модель. Для этого первоначально преобразуем звенья математической модели. Она содержит следующие звенья:

$$\begin{aligned} y &= \frac{k}{T_p} x \rightarrow y_i = y_{i-1} + \frac{k\Delta t}{T} x_i, \\ y &= \frac{k}{T_{p+1}} \rightarrow y_i = y_{i-1} + \frac{\Delta t(kx_i - y_{i-1})}{T}, \\ y &= \frac{T_1 p + 1}{T_2 p} \Rightarrow y_i = \frac{T_1}{T_2} x_i + \frac{\Delta t}{T_2} (x_i - x_{i-1}), \\ y &= \frac{T_p}{\gamma T_{p+1}} \rightarrow y_i = y_{i-1} + \frac{(x_i - x_{i-1})T - \Delta t y_{i-1}}{\gamma T}, \\ y &= \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1} \rightarrow y_i = \frac{T_1(x_i - x_{i-1}) + \Delta t x_i + T_2 y_{i-1}}{T_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Преобразуя систему уравнений (4) с учетом (5), получим:

$$\left\{ \begin{aligned} U_{зэi} &= U_{зэi-1} + (U_{зсi} - U_{този}) \frac{\Delta t}{T_{зи}}, \\ \Delta e_i &= U_{зэi} - U_{оэi} - U_{остi}, \\ U_{зні} &= \frac{T_{рэ}}{T_{ирэ}} \Delta e_i + \frac{\Delta t}{T_{ирэ}} (\Delta e_i - \Delta e_{i-1}), \\ \Delta U_{гi} &= U_{зні} - U_{огi}, \\ U_{рні} &= \frac{T_{рн}}{T_{ирн}} \Delta U_{гi} + \frac{\Delta t}{T_{ирн}} (\Delta U_{гi} - \Delta U_{гi-1}), \\ U_{вгi} &= U_{вгi-1} + \frac{\Delta t(k_{тп} U_{рні} - U_{вгi-1})}{T_{тп}}, \\ U_{гi} &= U_{гi-1} + \frac{\Delta t(k_{г} U_{вгi} - U_{гi-1})}{T_{г}}, \\ U_{яi} &= U_{гi}, \\ \Delta U_{яi} &= U_{яi} - E_i, \\ I_{яi} &= I_{яi-1} + \frac{\Delta t((1/R_e) \Delta U_{яi} - I_{яi-1})}{T_a}, \\ I_{динi} &= I_{яi} - I_{сi}, \\ \omega_i &= \omega_{i-1} + \frac{U_{Ti} k_E \Delta t}{R_e T_M} I_{динi}, \\ E_i &= k_E \omega_i, \\ U_{Ti} &= \begin{cases} 0, & \text{тормоз наложен,} \\ 1, & \text{тормоз снят.} \end{cases}, \\ U_{огi} &= k_u U_{гi}, \\ U_{оэi} &= k_u U_{яi} + k_u \frac{\Delta t(U_{яi} - U_{яi-1})}{\gamma T} - k_r k_{iI_{яi}}, \\ U_{остi} &= k_i k_{ост} I_{яi}, \\ U_{този} &= k_i k_{дт} \frac{T_1(I_{яi} - I_{яi-1}) + \Delta t I_{яi} + T_2 U_{този-1}}{T_2}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Методику составления вычислительной модели в виде системы алгебраических уравнений с включением в их состав решения дифференциальных уравнений можно представить следующим образом.

1. Производится декомпозиция звеньев, которые описываются дифференциальными уравнениями. Они представляются в виде совокупности идеального интегрирующего звена, масштабного и суммирующего.

2. Составляется система алгебраических уравнений в порядке, в котором выходная величина предыдущего уравнения является входной величиной для следующего.

3. Уравнения записываются так, чтобы в левой части было текущее значение выходной величины, а в правой – все остальные величины.

4. Уравнение решаются относительно аргумента t , т.е. может быть получена любая временная функция для любой выходной переменной.

Очевидно, что следует выделить управляющее устройство и объект управления.

Управляющему устройству соответствует следующая система уравнений:

$$\begin{cases} U_{зэi} = U_{зэi-1} + (U_{зсi} - U_{тозиi}) \frac{\Delta t}{T_{зэ}}, \\ \Delta e_i = U_{зэi} - U_{оэi} - U_{остi}, \\ U_{зні} = \frac{T_{рэ}}{T_{ирэ}} \Delta e_i + \frac{\Delta t}{T_{ирэ}} (\Delta e_i - \Delta e_{i-1}), \\ \Delta U_{гi} = U_{зні} - U_{огi}, \\ U_{рні} = \frac{T_{рн}}{T_{ирн}} \Delta U_{гi} + \frac{\Delta t}{T_{ирн}} (\Delta U_{гi} - \Delta U_{гi-1}), \\ U_{огi} = k_u U_{гi}, \\ U_{оэi} = k_u U_{яi} + k_u \frac{\Delta t (U_{яi} - U_{яi-1})}{\gamma T} - k_r k_i I_{яi}, \\ U_{остi} = k_i k_{ост} I_{яi}, \\ U_{тозиi} = k_i k_{дт} \frac{T_1 (I_{яi} - I_{яi-1}) + \Delta t I_{яi} + T_2 U_{тозиi-1}}{T_2}. \end{cases} \quad (7)$$

Структура вычислительной модели управляющего устройства, соответствующая (7), показана на рис. 2.

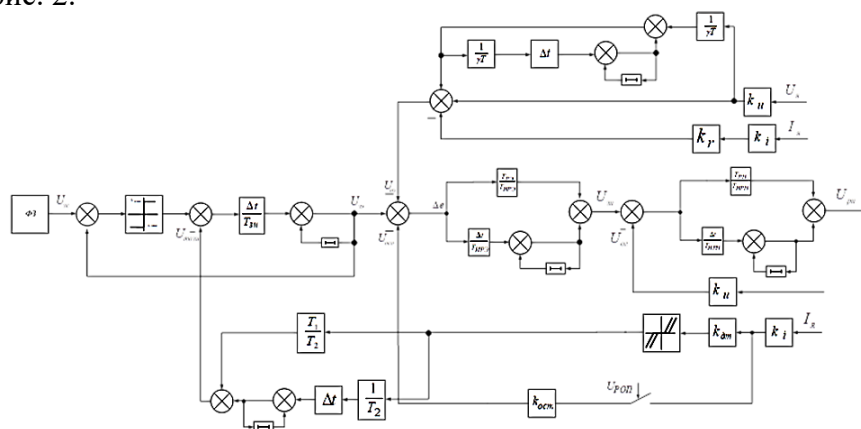


Рис. 2. Вычислительная модель управляющего устройства

Объекту управления соответствует следующая система уравнений:

$$\begin{cases} U_{вгi} = U_{вгi-1} + \frac{\Delta t (k_{тп} U_{рніi} - U_{вгi-1})}{T_{тп}}, \\ U_{гi} = U_{гi-1} + \frac{\Delta t (k_{г} U_{вгi} - U_{гi-1})}{T_{г}}, \\ U_{яi} = U_{гi}, \\ \Delta U_{яi} = U_{яi} - E_i, \\ I_{яi} = I_{яi-1} + \frac{\Delta t ((1/R_э) \Delta U_{яi} - I_{яi-1})}{T_{я}}, \\ I_{динi} = I_{яi} - I_{сi}, \\ \omega_i = \omega_{i-1} + \frac{U_{ти} k_E \Delta t}{R_э T_M} I_{динi}, \\ E_i = k_E \omega_i. \end{cases} \quad (8)$$

Структура вычислительной модели объекта управления, соответствующая (8), показана на рис. 3.

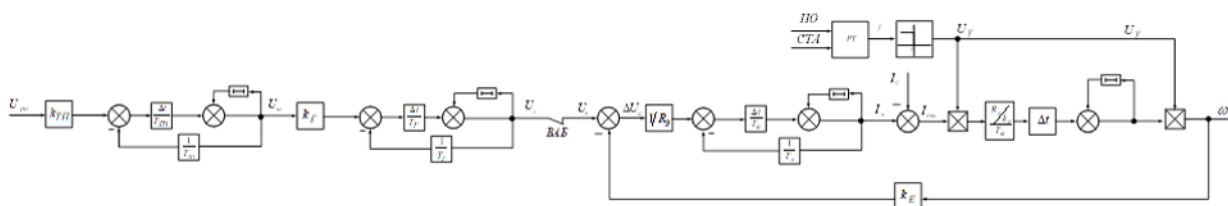


Рис. 3. Вычислительная модель объекта управления

Приведенные на рис. 2 и 3 вычислительные модели имеют следующие параметры: $T_{3u}=0,356$ с, $T_{PЭ}=0,4476$ с, $T_{ИРЭ}=0,373$ с, $T_{PH}=93,312$ с, $T_{ИРH}=3,2$ с, $k_{TH}=76,32$ В/В, $T_{TH}=0,01$ с, $k_L=10,63$ В/В, $T_L=1,6$ с, $R_{Э}=0,039$ Ом, $T_{я}=0,1$ с, $T_M=0,67$ с, $k_E=262$ В·с, $k_i=0,00125$ В/А, $k_{\mu}=0,05$ В/В, $k_r=0,156$ В/А, $k_{осм}=0,156$ В/А, $T=0,67$ с, $\gamma=0,1$ с.

Выберем Δt . Минимальная постоянная времени равна 0,01 с, следовательно, $\Delta t = 0,001$ с. Далее необходимо подставить параметры в вычислительную модель и произвести настройку регуляторов, и токоограничений. При достаточно точном совпадении параметров с реальным объектом, практически не требуется значительная доводка на объекте. Это является большим преимуществом ЦСУ т.к. в них значительно снижены помехи, и достигается высокая точность воспроизведения передаточных функций. Кроме того, вычислительная модель составляется на том же языке программирования для контроллера.

После постройки вычислительной модели выделяется управляющее устройство и составляется программа. Система готова к внедрению на объекте. Таким образом можно составить методику.

Выводы. Предложена методика получения ВМ позволяющая производить совместное исследование решений дифференциальных уравнений с алгебраическими уравнениями. Данная модель позволяет осуществить синхронизацию объекта управления (ОУ) и управляющего устройства и организовать вычислительный процесс на модели в реальном времени.

Описана математическая модель и алгоритмическая структура, позволяющая производить исследования в реальном времени с применением контроллеров при реализации цифровых систем управления.

Предложенная методика составления вычислительной модели и управляющего устройства позволяет значительно упростить процесс исследования, программирования и наладки системы управления, что значительно увеличивает надежность и достоверность программного обеспечения процессов управления.

При достаточно точном совпадении параметров модели с реальным объектом практически не требуется доводка на объекте управления, т.к. вычислительный модель реализуется на том же языке программирования.

Список литературы

1. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» : приказ Ростехнадзора от 08.12.2020, № 505 // Справочно-правовая система «Консультант-плюс». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372372/
2. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 1999. – 330 с.
3. Островляничик В. Ю. Автоматический электропривод постоянного тока горно-металлургического производства. – Новокузнецк : СибГИУ, 2004. – 382 с.