

Проектирование комплекса программных средств для управления индукционным оборудованием металлургического производства с помощью теории систем

А. Н. Ильюшина

*Санкт-Петербургский
технический колледж управления
и коммерции
bdbyu@mail.ru*

И. М. Першин

*Северо-Кавказский федеральный
университет
ivmp@mail.ru*

В. Е. Трушников

*Санкт-Петербургский горный
университет
Trushnikov_VE@pers.spmi.ru*

И. М. Новожилов

*Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
novozhilovim@list.ru*

Д. А. Первухин

*Санкт-Петербургский горный
университет
Pervukhin_DA@pers.spmi.ru*

Д. Л. Тукеев

*Санкт-Петербургский горный
университет
Tukeev_DL@pers.spmu.ru*

Аннотация. Работа технических средств невозможна без соответствующего программного обеспечения. В рамках данного исследования спроектирован алгоритм и программный модуль для программируемого логического контроллера, обеспечивающего управление индукционным оборудованием. Полученный программный модуль прошел апробацию и предложен к технической реализации в рамках системы подачи заготовок для сталелитейного производства.

Ключевые слова: идентификация систем, измерения, анализ, датчики, теория управления

I. ВВЕДЕНИЕ

Интеграция цифровых средств во все области промышленности с каждым годом приобретает все большие масштабы. Программируемые логические контроллеры позволяют не только осуществлять контроль и управление технологическим процессом. Но и создают предпосылки для повышения экономической эффективности производства в целом. Металлургия одна из ключевых отраслей экономики любой страны. По этой причине, цифровизация металлургических производств идет гораздо более высокими темпами. Однако применение ПЛК для решения задач металлургии осложнено не только массогабаритными характеристиками, но техническим регламентом по пожара- и взрывобезопасности. В этих условиях разработка систем управления различными производствами требует индивидуального, иногда исключительного подхода. Например, производство алюминия [1, 2] осложнено не стационарностью электромагнитного поля; добыча нефти [3, 4], угля [5, 6], минеральной воды [7, 8], осложнено структурой пласта и не стационарностью входных воздействий и граничных условий. Таким образом, разработка систем управления технологическим процессом требует глубокого анализа входных, выходных и результирующих параметров. Это главным образом связано с определением входных и

выходных данным программных средств управления. В металлургии такими средствами выступают программируемые логические контроллеры (ПЛК). Однако их нестационарность требует разработки уникальных алгоритмов и программных модулей исходя из конкретных условий производства.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках данного исследования ставится задача разработки программного модуля для программируемого логического контроллера управления движением заготовок для металлургической печи.

III. ВЫБОР КОНТРОЛЛЕРА

Выбор технических средств производится на основе исходных данных об объекте управления, сценарии работы и задачах, поставленных перед системой автоматизации. Исходными данными являются количество входных и выходных сигналов, параметры сигналов. Используя информацию о задачах системы автоматизации, определяются такие параметры как: быстродействие и объем памяти контроллера, коммуникационные возможности (типы сетей), наличие и параметры программируемого терминала и станции верхнего уровня.

Модульный принцип построения комплексов АСУТП позволяет создавать разнообразные информационно-управляющие системы автоматизации на единой аппаратной платформе.

Будут выбраны:

- модуль ЦПУ;
- модуль дискретных входов;
- модуль дискретных выходов;
- модуль аналоговых входов;
- модуль аналоговых выходов.

При выборе оборудования будем отталкиваться от использования устройств семейства CJ1 (компания Omron). Таким образом, будет обеспечена совместимость модулей ввода/вывода и процессоров.

Нам необходимо обеспечить ввод в контроллер следующее количество сигналов:

1. дискретный ввод – 123 сигнала;
2. дискретный вывод – 81 сигнала;
3. аналоговый ввод – 16 сигналов;
4. аналоговый вывод – 8 сигналов.

В разработанной структуре системы контроллер должен обеспечивать прием и обработку большого количества входных сигналов. На него ложится реализация алгоритмов функционирования системы. Кроме того, контроллер должен обладать широкими коммуникационными возможностями.

Исходя из этих условий, был выбран контроллер семейства CJ1 компании Omron. В качестве модуля центрального процессора выбираем CJ1M – CPU12 – ETN. Интерфейс связи Ethernet необходимо обеспечить для взаимодействия контроллера и SCADA-системы, которая находится удаленно. Взаимодействие контроллера и SCADA выходит за рамки данного дипломного проекта, а здесь лишь обеспечивается наличие канала обмена данными. Основные характеристики приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ CJ1M – CPU12 – ETN

Описание	Модуль ЦПУ CJ1M с портом Ethernet
Возможности дискретного ввода/вывода	320 точек
Макс. количество модулей ввода/вывода любого типа	10 модулей
Емкость памяти программ	10 000 шагов
Память данных	32 000 слов
Время выполнения двоичной команды	100 нс
Коммуникационные порты	1 периферийный мини-порт + комбинированный RS-232C + Ethernet 100BaseTX

Для питания контроллера будем использовать модуль CJ1W-PA205C.

Для обеспечения ввода дискретных сигналов используем 2 модуля CJ1M — ID261 по 64 входа каждый, в случае необходимости обеспечения резервного запаса входных сигналов возможно дополнительно использовать CJ1M — ID231 с 32 входами.

Для обеспечения дискретного вывода используем модули CJ1M — OD261 и CJ1M — OD231 по 64 и 32 выхода соответственно.

Далее будет выбран специальный модуль аналогового вывода. Сигналы с этого модуля будут приходить на преобразователи частоты, которые, в свою очередь, будут управлять непосредственно нагревом (индуктором). В системе рассматривается управление 8 печами. Для последующего расширения разрабатываемой системы используем модуль CJ1W-DA08V, который имеет по 8 выходов. Технические характеристики имеющихся модулей приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯ CJ1W-DA08V

Наименование	Характеристика
Выходы	8 выходов
Диапазон значения сигнала	Напряжение: 1...5 В, 0...10 В, -10...10 В; ток: 4...20 мА
Максимальный ток нагрузки (для выходов напряжения)	2.4 мА
Варианты диапазонов значения сигнала	8 вариантов (по одному для каждого выхода)
Разрешение	1/4000 (по умолчанию) или 1/8000 (устанавливается)
Скорость преобразования	1.0 мс/выход (по умолчанию) или 250 мкс/выход (устанавливается)
Общая точность (при температуре от 55 °С)	Напряжение: ±0.5%; ток: ±0.8%
Соединения	Блок клемм
Номер модуля	От 0 до 95
Внешний источник питания	24 В = +10% ... 15%; макс. 140 мА

Для ввода аналоговых сигналов с преобразователя частоты и пирометров используем 2 модуля аналоговых вводов CJ1W-IDDA08V. При этом для нормировки сигнала ПЧ (0...60 В) используем универсальный преобразователь KFU8-USC-1.D фирмы Pepperl+Fuchs. Это устройство позволяет каждый поддиапазон определяемых пользователем шкал входных сигналов 0...20 мА, 0...10 В, и 0...60 мВ преобразовывать в масштабы стандартных измерительных сигналов 0/4...20 мА или 0/2...10 В.

При построении разрабатываемой системы будет использована сеть Host Link, предназначенная для объединения программируемых контроллеров фирмы «Omron» с компьютерами и другими устройствами, способными вести обмен информацией по последовательному каналу связи. Интерфейсы сети: RS-232C, RS-422. Данная сеть выбрана по нескольким причинам.

Во-первых, она позволяет производить программирование контроллеров, мониторинг и диагностику систем управления. Совместное использование Host Link со SCADA-приложениями дает возможность построения многофункциональных автоматизированных систем управления объектами различного назначения.

Во-вторых, данная сеть полностью совместима с контроллером. Будет применена конфигурация Single-link сети. При этом объединение компьютера и контроллера осуществляется по последовательному каналу (используется один из COM-портов в ПК, модуль связи Host Link – в контроллере) (рис. 1)

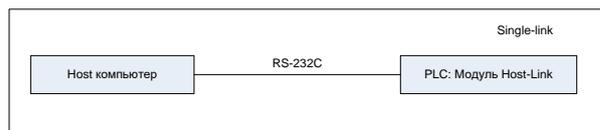


Рис. 1. Конфигурация Single-Link сети Host-Link

Объединение компьютера и контроллера осуществляется по последовательному каналу. Для этой цели в компьютере используется один из имеющихся последовательных портов (COM), а в программируемом контроллере – модуль связи Host-Link. Все семейство CJ1 поддерживают передачу команды FINS путем выполнения команд обмена данными по сети на ПЛК.

IV. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Выбранный преобразователь обеспечивает три способа реализации позиционирования привода:

- по внешнему датчику;
- по датчику двигателя (инкрементный датчик/резольвер);
- по датчику абсолютного отсчета.

Двигатель оборудован инкрементным датчиком/резольвером, он выдает на преобразователь сигнал частоты вращения с высокой точностью.

В качестве контроллера выбираем микроконтроллер семейства PHILIPS /NXP LPC2000, а именно LPC 2148. Микроконтроллеры этого семейства построены на основе высокоскоростного низкопотребляющего микропроцессорного ядра ARM7TDMI-S с Flash памятью, имеют максимальную тактовую частоту 60 МГц, с нулевым временем ожидания и схему слежения за реальным временем.

Выбор данного контроллера для решения нашей задачи автоматизации обусловлен в первую очередь их точностью и надежностью. Немаловажным условием при выборе контроллера являются его коммуникационные возможности для обеспечения устойчивой связи в производственных условиях (как с периферийным оборудованием, так и с вышестоящим уровнем автоматизации).

Отличительные особенности LPC 2148:

- 513 кБ Flash – памяти программ, 32 кБ ОЗУ, USB 2.0, часы реального времени, 2 порта UART, SPI, восемь каналов захвата/хранения, ШИМ (шесть выходов), «WATCHDOGTIMER», 5В совместимые входы/выходы, работоспособность до 60 МГц (встроенный PLL);
- память программ 512 кБ;
- память данных 32+8 кБ;
- 45 портов ввода/вывода;
- 10-битный ЦАП;
- 8 10-битных АЦП;
- 2 32-битных таймера T0 и T1 устройств;
- Встроенный резонатор 12 МГц для максимальной тактовой частоты ($5 \cdot PLL = 60\text{МГц}$).

Контроль скорости осуществляется путем изменения напряжения на входе АП1 преобразователя, в диапазоне от 0 до 10 В. При этом используем встроенный 10-разрядный ЦАП микроконтроллера. Аналоговый выход ЦАП подключается к АП1, в программное управление скоростью осуществляем образом:

Максимальное цифровое значение ЦАП: $2^{10} = 1024$, таким образом, максимальное значение угловой скорости при движении без заготовки

$$\omega_{\max} = 4,775\text{рад/с} \rightarrow 1024 ,$$

с заготовкой

$$\omega_{\max} = 4,105\text{рад/с} \rightarrow 880 ,$$

время разгона до $\omega_{\max} = 4,105\text{рад/с}$ равно 4,56 с, время разгона до $\omega_{\max} = 4,775\text{рад/с}$ равно 3,82 с.

Для участков ускорений будем поступать следующим образом:

$$\begin{aligned} 1024/128 &= 8; \\ 880/80 &= 11. \end{aligned}$$

Таким образом, разбиваем время $t_{a1} = 4,56$ на 80 частей и в значение регистра ЦАП добавляем число 11 за каждое переполнение $t_{a1}/80$ таймера T0 80 раз. Это будет соответствовать ускорению $a_{\max 1}$.

Аналогично разбиваем время $t_{a2} = 3,82$ на 128 частей и в значение регистра ЦАП добавляем число 8 за каждое переполнение $t_{a1}/128$ таймера T0 128 раз, т.е. до ускорения $a_{\max 2}$. При достижении поддерживаем значение в регистре ЦАП постоянным все время t_{r1} и t_{r2} (время движения с постоянной скоростью).

Для расчета параметров перемещения и правильного позиционирования привода устройство управления должно знать число импульсов датчика (инкрементов) на единицу длины перемещения. Кроме того, с помощью функции изменения масштаба можно задать произвольную единицу измерения, соответствующую данному случаю применения. Перед вводом привода в эксплуатацию в режиме позиционирования по датчику необходимо активизировать его и установить его масштаб.

Изменение направления осуществляется путем воздействия на вход DI01 (направо) и DI02 (налево). На следующей диаграмме показано состояние двигателя при подаче сигналов на клеммы X12:1...X13:6. Двоичный выход X10:3 (DB00 «Тормоз») используется для подключения тормозного контактора K12.

Для создания и загрузки программ необходим ПК с интерфейсом USB или RS-232. При этом используется интегрированная среда разработки KeilArm и uVision3.

V. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА

При разработке алгоритмов для системы, разрабатываемой в данном дипломном проекте, мы будем основываться в первую очередь на сценарии работы системы, а также на необходимых условиях и требованиях к ней. Необходимо обеспечить обработку всех поступающих в контроллер сигналов управления, а также вывод управляющих воздействий для подсистем (управление агрегатами) и сигнализацию (пульты, колонны). Алгоритмы также должны обеспечить обработку ошибок и блокировок [9, 10].

С точки зрения «поток данных» в системе присутствует 6 организованных объектов, для каждого из которых есть свой сценарий работы. Следовательно, для каждого из них можно составить свой алгоритм работы, а взаимодействие с другими он будет осуществлять по обозначенным точкам сопряжения (точкам входа). Действия на точки входа будут срабатывать при наличии необходимых и достаточных

скоррелированных и сопряженных условий. Образная модель приведена на рис. 2.

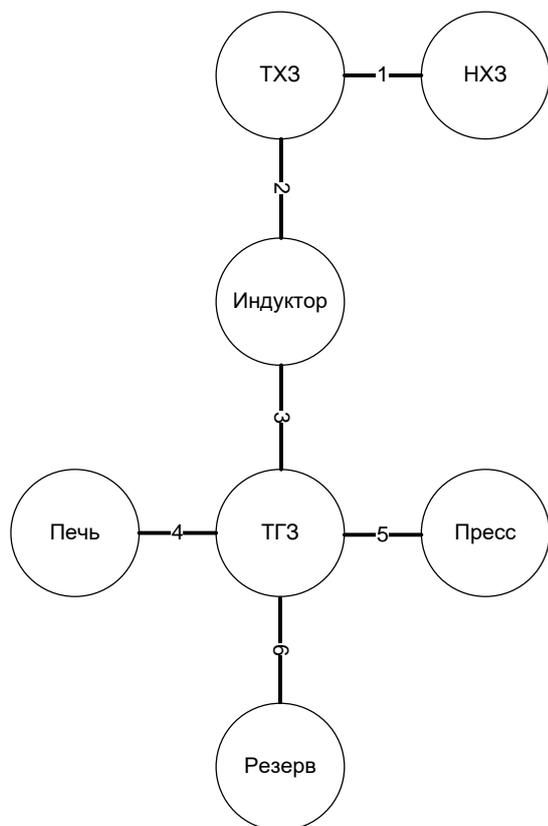


Рис. 2. Модель взаимодействия объектов системы

На данной модели цифрами обозначены точки входа.

Определим особенности этих точек для дальнейшего построения алгоритмов:

- для всех точек входа осуществляется фиксация перемещения транспорта и сигнализация;
- точка входа (2) срабатывает по двум условиям – загрузка индуктора и проталкивание заготовки на ТГЗ.

При построении алгоритма будем оперировать следующими установками: посылка команды в систему осуществляется оператором (соответствующей роли) с пульта агрегата (нажатие кнопки), обратная связь в виде сигнализации на пультах (лампы), изменение параметров состояния объектов (данных в памяти описывающих полное состояние системы – слова состояния и отображения).

VI. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ

Программирование ПЛК производится с помощью программы CX-Programmer, входящей в состав пакета CX-One. CX-One представляет собой единую среду программирования и настройки, которая позволяет пользователю создавать, настраивать и программировать сети, ПЛК, терминалы, системы динамического управления, регуляторы частоты (приводы), регуляторы температуры и датчики. Результатом внедрения единого программного обеспечения является упрощение разработки и возможность программирования и настройки автоматизированной системы с минимальным обучением персонала.

Программное обеспечение CX-Programmer является единой программной платформой для программирования всех ПЛК (программируемых логических контроллеров) OMRON, начиная от микро-ПЛК и до самых мощных контроллеров с дублированным центральным процессором. ПО позволяет легко преобразовывать и повторно использовать программный код для различных типов ПЛК. Для ясного описания назначения и работы управляющего программного кода предусмотрены мощные возможности документирования, позволяющего хранить документацию в ПЛК [11, 12]. Функции техобслуживания позволяют выполнять поиск контактов и цепочек одним щелчком мыши, что обеспечивает оперативное выявление причин остановки станка или производственной линии, а функции контроля, отображения и отладки снижают продолжительность разработки и затраты на внедрение. Усовершенствованные функции отслеживания данных и контроля временной циклограммы снижают время техобслуживания, поиска и устранения неисправностей. Затем эти данные можно использовать для более тонкой настройки характеристик станочного оборудования, а также для сокращения длительности и оптимизации рабочего цикла станков. Для повышения производительности программирования и отладки операции создания цепочек, поиска и перехода могут выполняться по нажатию клавиши. Кроме того, различные функции создания комментариев упрощают чтение и поиск программ [13, 14].

Ниже приведен фрагмент управляющей программы, описывающий ввод данных.

```
VOID T0_INT(VOID)_IRQ;
VOID TL_INT(VOID)_IRQ;
VOID USKORL (VOID);
VOID USKOR2(VOID);
VOID TRL(VOID);
VOID TR2(VOID);
VOID PI (VOID);
VOID T21 (VOID);
```

Для обеспечения ввода параметром используется тип данных интеджер. Для описания строк входных параметров используются тип данных список. Фрагмент кода, демонстрирующий данную функцию, выглядит следующим образом [15]:

```
UNSIGNED INT INCREMENT1, INCREMENT2,
DESKRETNOST1 = 8, DESKRETNOST2=11;
UNSIGNED INT DAC_VALUE;
INT PL,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8;
UNSIGNED INT
POLOZHENIA[]={PL,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8};
#define STOP (IOPIN1 & OXEFFFFFFF);
```

Далее необходимо осуществить установку первичных значений системы. Например, значения полюсов входа и мощность входных параметров. Для этой цели используется блок первичного присвоения информации. Фрагмент данного блока представлен ниже:

```
INT MAIN (VOID) {
VPBDW = 0X00000002; //SET PCLK
TO 30 MHZ
```

```

PINSELO = 0X00000880;           //ENABLEPIN
0.2 AS CAPTURE CHANNEL0
PINSEL1 = 0X000C0000; //SET DACAOUT ON
P0.25
TOPR = 0X000000 IE;           //LOAD PRESALER
T1PR = 0X00007530;           //LOAD PRE SCALER
FOR 1 MSEC TICK
T0TCR = 0X00000002;           //RESET
COUNTER ANDPRESALE
T1TCR = 0X00000002;           //RESET
COUNTER ANDPRESCALER
T0MCR = 0X00000003;
T1MCR = 0X00000003;
MCVTECTADDR0 = (UNSIGNED)TO_INT; //SET
THE TIMER ISR VECTOR ADDRESS
VICVECTCNTL0 = 0X00000024; //SET
CHANNEL
VICVECTADDR1 = (UNSIGNED)T1_INT; //SET
THE TIMER ISR VECTOR ADDRESS
VICVECTCNTL1 = 0X00000024; //SET
CHANNEL
T0TCR = 0X00000001;           //START
TIMER 0
T1TCR = 0X00000001;           //START
TIMER 1

```

Далее приведены фрагменты кода описывающие ключевые функции ПЛК. В частности код осуществляющий первичное переназначение потоков данных с датчиков на элементы разработанного программируемого логического контролера.

```

VICINTENABLE = 0X00000010; //ENABLE
THE INTERRUPT
AD0CR = 0X00270601; //SETUP A/D: 10-BIT
AIN @ 3MHZ
AD0CR = 0X01000000; //START A/D
CONVERSION

```

Элементы описывающие запись структур данных в массив.

```

WHILE (1)
{
DACR = DAC_VALUE;
DO
{
VAL = AD0DR; //READ A/D DATA REGISTER
}
WHILE ((VAL & 0X80000000) == 0);
//WAITFOR THE CONVERSION TO COMPLETE
VAL = ((VAL >> 6) & 0X03FF)<<16;
//EXTRACT THE A/D RESULT
IF(VA==POLOZHENIA[I])
{
STOP = 0X00000000;
STOP = 0X00000001;
}
}
}

```

Элементы осуществляющие проверку полученных данных на предмет ошибок.

```

VOID TO_INT()_IRQ
{
SWITCH(TOIR)
CASE 0X01:
USKOR1();
BREAK;
CASE (0X01<<1):
USKOR2();
BREAK;
DEFAULT: BREAK;
}

```

И ключевой элемент алгоритма – Регулятор осуществляющий контроль мощности для обеспечения равномерного движения заготовки.

```

IF((DAC_VALUE < 1024)&&(INCREMENT1<
128))
{
DAC VALUE += DESKRETNOST2;
INCREMENT2++;
IF(DAC_VALUE >= 1024)
{
DAC_VALUE = 1024;
TOIR = 0X00000001;
VICVECTADDR =
0X00000000;
VICINTENABLE =
0X00000020;
}
RETURN;
}
}

```

Таким образом, приведенные элементы программного кода обеспечивают выполнение поставленной задачи по обеспечению равномерного движения заготовки в металлургическом производстве.

VII. Выводы

Металлургическое производство имеет огромное количество особенностей технологического процесса, которое оказывает существенное влияние на структуру и механизмы организации системы АСУТП. В рамках данного исследования разработан программный комплекс для ПЛК обеспечивающий необходимую скорость движения заготовки по стану металлургической печи. Элементами управления в такой печи выступают индукционные элементы, обеспечивающие движение. Также необходимо отметить, что при разработке системы управления учитывались пространственные параметры объекта. Таким образом, разработанный алгоритм и программный модуль относятся к области теории систем с распределенными параметрами. К недостаткам данной системы можно отнести ее узконаправленность. Но это является и положительной стороной, так как обеспечивает высокую точность процесса регулирования. Обеспечение совместимости данного модуля с другими металлургическими печами является предметом дальнейшего исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Polekhina V.S., Shestopalov M.Y., Plyushin Y.Y. Identification of Magnetic Field Strength Realisation as a Necessary Solution for High-Quality Metal Synthesis (2022) Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and

- Electronic Engineering, ElConRus 2022, pp. 831-833. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755649
- [2] Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B. Investigation of Popov's Lines' Limiting Position to Ensure the Process Control Systems' Absolute Stability. In Proceedings of the 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 24–26 May 2023; pp. 236–239. <https://doi.org/10.1109/SCM58628.2023.10159089>.
- [3] Ilyushin Y.V., Kapostey E.I. Developing a Comprehensive Mathematical Model for Aluminium Production in a Soderberg Electrolyser. *Energies* 2023, 16, 6313. <https://doi.org/10.3390/en16176313>
- [4] Ilyushin Y.V. Development of a Process Control System for the Production of High-Paraffin Oil. *Energies* 2022, 15, 6462. <https://doi.org/10.3390/en15176462>
- [5] Pershin I.M., Papush E.G., Kukharova T.V., Utkin V.A. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells. *Water* 2023, 15, 2289. <https://doi.org/10.3390/w15122289>
- [6] Kukharova T.V., Ilyushin Y.V., Asadulagi M.-A.M. Investigation of the OA-300M Electrolysis Cell Temperature Field of Metallurgical Production. *Energies* 2022, 15, 9001. <https://doi.org/10.3390/en15239001>
- [7] Olga Afanaseva, Oleg Bezyukov, Dmitry Pervukhin, Dmitry Tukeev. Experimental Study Results Processing Method for the Marine Diesel Engines Vibration Activity Caused by the Cylinder-Piston Group Operations. *Inventions* 2023, 8(3), 71; <https://doi.org/10.3390/inventions8030071>
- [8] Golovina E., Shchelkonogova O. Possibilities of Using the Unitization Model in the Development of Transboundary Groundwater Deposits. *Water (Switzerland)*, 2023, 15(2), 298. <https://doi.org/10.3390/w15020298>
- [9] Martirosyan K.V., Chenyshev A.B., Martirosyan A.V. Application of Bayes Networks in the Design of the Information System “Mineral Water Deposit”. In Proceedings of the 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 24–26 May 2023; pp. 236–239. <https://doi.org/10.1109/SCM58628.2023.10159085>.
- [10] Ereemeeva A.M., Kondrasheva N.K., Khasanov A.F., Oleynik I.L. Environmentally Friendly Diesel Fuel Obtained from Vegetable Raw Materials and Hydrocarbon Crude // *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 5. <https://doi.org/10.3390/en16052121>
- [11] Ereemeeva A.M., Ilyushin Y.V. Automation of the control system for drying grain crops of the technological process for obtaining biodiesel fuels. *Sci Rep* 13, 14956 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41962-0>
- [12] Katysheva E. Analysis of the Interconnected Development Potential of the Oil, Gas and Transport Industries in the Russian Arctic. *Energies* 2023, 16, 3124. <https://doi.org/10.3390/en16073124>
- [13] Marinina O., Nechitailo A., Stroykov G., Tsvetkova A., Reshneva E., Turovskaya L. Technical and Economic Assessment of Energy Efficiency of Electrification of Hydrocarbon Production Facilities in Underdeveloped Areas. *Sustainability* 2023, 15, 9614. <https://doi.org/10.3390/su15129614>
- [14] Ilyushin Y., Afanaseva O. Development of the drilling screws temperature field pulse management for the Kislovodsky narzan deposit hot mineral water mining (2019) International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 19 (2.1), pp. 849-856.
- [15] Sidorenko A.A., Dmitriev P.N., Alekseev V.Yu., Sidorenko S.A. Improvement of technological schemes of mining of coal seams prone to spontaneous combustion and rockbumps. *Journal of Mining Institute*. 2023, p. 1-13. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.37>