

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПУТЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ПОДАЧИ ВОЗДУХА**

**Г. И. Канюк, С. Ф. Артюх, М. А. Попов**

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина

*В статье представлен комплекс технических решений, способствующих повышению точности и быстродействия САР производительности турбокомпрессорного агрегата и как следствие – повышение эффективности и качества технологического процесса доменной выплавки чугуна. Также предложены запатентованные способы компенсации погрешностей систем регулирования и метрологического обеспечения.*

**Ключевые слова:** доменное производство, турбокомпрессорные агрегаты, электрогидравлическая система регулирования, метрологическое обеспечение, точность, быстродействие.

### **Постановка задачи**

Интенсивность и эффективность процесса доменной плавки и качество чугуна существенно зависят от стабильности количества воздуха, подаваемого турбокомпрессорными агрегатами на колошники доменных печей. Эта стабильность обеспечивается электрогидравлической системой автоматического регулирования (ЭГСР), которая поддерживает постоянный заданный расход воздуха при изменении давления на колошнике путем соответствующего изменения частоты вращения турбины. В существующих ЭГСР обычно используются традиционные промышленные ПИД – регуляторы. Такие регуляторы обладают высокой чувствительностью к изменению параметров системы и не обеспечивают соответствующей адаптивной самонастройки коэффициентов регулятора. Метрологическое обеспечение существующих ЭГСР не обеспечивает номенклатуры и точности измерения параметров, необходимых для поддержания точности подачи воздуха в требуемых пределах (2-3 % от номинального значения). Это приводит к снижению интенсивности и эффективности процесса плавки, увеличению расхода кокса, ухудшению качества чугуна. При этом экономические потери в масштабах Украины составляют до 1 млрд. грн. в год [1- 4].

С целью решения указанной проблемы специалистами Украинской инженерно-педагогической академии и Алчевского металлургического комбината выполнен цикл теоретических и экспериментальных исследований. Разработаны математические модели турбокомпрессорного агрегата, обеспечивающего подачу воздуха в домну и исполнительного механизма

системы автоматического регулирования. Выполнена идентификация параметров математических моделей по результатам натуральных экспериментов. Выполнен структурно-параметрический синтез прецизионного регулятора подачи воздуха на основе решения обратных задач динамики турбокомпрессора и элементов электрогидравлической системы регулирования, разработаны предложения по эффективному метрологическому обеспечению САР.

### **Основная часть**

С целью повышения точности и быстродействия САР предлагаются :

– использование для перемещения клапанной traversы электрогидравлического исполнительного механизма, состоящего из гидроцилиндра поступательного движения (сервомотора), шток которого непосредственно соединён с traversой, и пропорционального сервоклапана типа УЭГ.С с электронным микропроцессорным управлением (управляющая ЭВМ);

– использование прецизионной системы измерения объемного расхода подаваемого воздуха, например, на базе роторных счетчиков, имеющих погрешность менее 1% [5] или дифференциальных датчиков типа «Сапфир» с тензoeлектрическими преобразователями;

– использование в структуре электронного регулятора эффективных алгоритмов управления, обеспечивающих компенсацию различных видов статических и динамических ошибок (алгоритмы модального управления, алгоритмы управления на основе решения обратных задач динамики, алгоритмы линеаризующей коррекции нелинейных статических характеристик), структурированные на основе принципа мультипликативного управления [6]). Принципиальная схема рациональной структуры САР приведена на рис.1, соответствующая функциональная схема – на рис.2.

### **Структурный синтез регулятора**

Учитывая значительное количество в структуре исполнительного механизма САР автономных элементов с измеряемыми выходными параметрами (сервоклапан, гидродвигатель, турбина, компрессор) (см. рис.1, 2), целесообразно при структурном синтезе регулятора использовать принцип мультипликативного управления [6], основанный на построении автономных

контуров управления отдельными элементами. Этот принцип дает возможность упрощения структуры, параметрического синтеза и настройки параметров регулятора. Структура мультипликативного регулятора приведена на рис. 3. Он включает четыре автономных контура управления: положением золотника сервоклапана; положением гидродвигателя (сервомотора); частотой вращения турбины и производительностью компрессора.

Измерительный блок при этом, соответственно включает в себя датчики положения золотника ( $D_{xz}$ ) и гидродвигателя ( $D_{x20}$ ), частоты вращения ротора турбокомпрессора ( $D_{\omega}$ ), объемной производительности компрессора ( $D_{Qk}$ ) и давления в напорном воздуховоде ( $D_{pk}$ ).

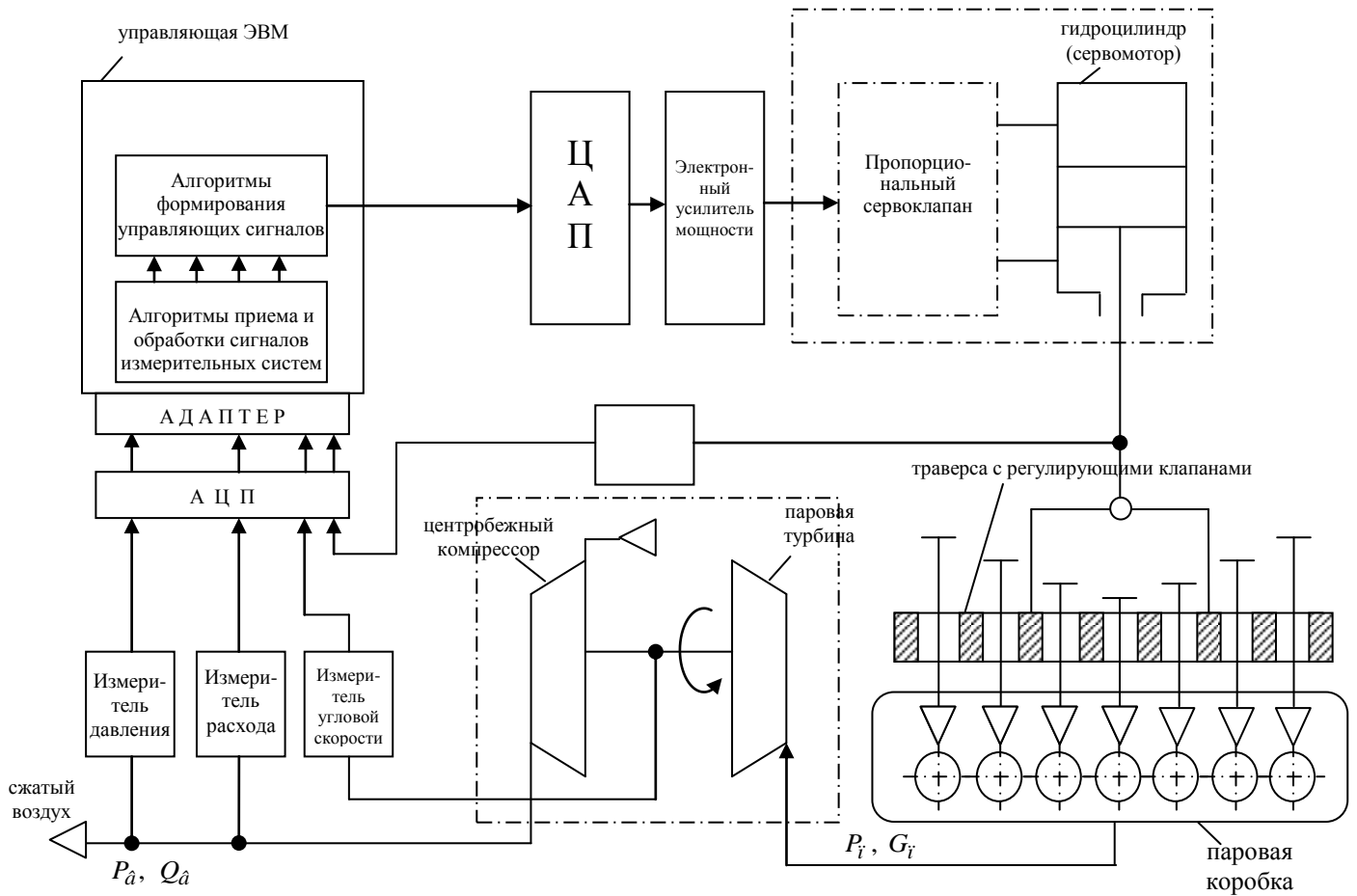


Рис. 1. Принципиальная схема прецизионной САР производительности турбокомпрессорного агрегата

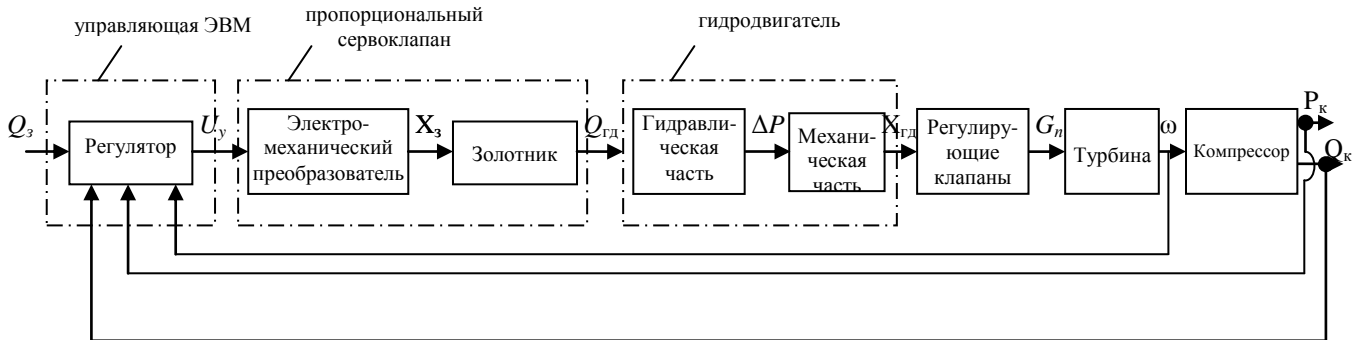


Рис. 2. Функциональная схема прецизионной САР производительности турбокомпрессорного агрегата

С целью повышения точности регулирования по основному параметру (расходу воздуха) целесообразно использовать электронную систему коррекции (компенсации) систематических погрешностей измерителя расхода [6], которая основана на сравнении фактических показаний с прецизионной градуировочной

характеристикой и введении соответствующей корректирующей поправки в измеряемый сигнал.

Расход, обеспечиваемый компрессором, частично расходуется на сжатие воздуха в напорном воздухопроводе при изменении давления

$$Q_{сж} = \frac{V}{\chi} \dot{P}_k; \quad (1)$$

и на непроизводительные утечки

$$Q_{ум} = k_{ум} P_k; \quad (2)$$

остальная часть его ( $Q_\kappa$ ) полезно используется в домне.

При этом уравнение баланса расходов имеет вид

$$Q_\kappa = Q_{сж} + Q_{ум} + Q_\epsilon; \quad (3)$$

или

$$\frac{V}{\chi} \dot{P}_k + k_{ум} P_k = Q_\kappa + Q_\epsilon; \quad (4)$$

или

$$T_p \dot{P}_k + P_k = K_{QP} (Q_\kappa + Q_\epsilon); \quad (5)$$

$$\text{где } T_p = \frac{V}{\chi k_{ум}}; \quad K_{QP} = 1/k_{ум};$$

$V$  – объем полости напорного воздухопровода;

$\chi$  – адиабатический модуль объемной упругости воздуха;

$k_{\epsilon\delta}$  – коэффициент утечек.

Измерение положения, давления и частоты вращения может осуществляться с достаточно высокой точностью, а точное измерение расхода воздуха может представлять значительную техническую проблему не только из-за систематических погрешностей, но и вследствие шумов и случайных погрешностей, обусловленных изменениями режима движения, пульсациями давления и образования вихревых зон в потоке. С целью отделения этих погрешностей от спектра основного сигнала может использоваться в измерительной схеме фильтр Калмана – Бюси (наблюдатель состояния, основанный на использовании эталонной модели процесса).

В работе [6] на основе цикла теоретических и экспериментальных исследований показано, что наиболее эффективные алгоритмы управления и регуляторы прецизионными САР (в частности – электрогидравлическими следящими системами) могут быть синтезированы на основе решения обратных задач динамики управляемого объекта. Такие алгоритмы обеспечивают высокое быстродействие систем, надежную компенсацию ошибок, обусловленных астатизмом любого порядка, имеют унифицированную и простую в

практической реализации структуру, являются робастными (т.е. малочувствительными к изменению параметров объекта в процессе эксплуатации), способны обеспечивать эффективное управление с использованием только одного измеряемого сигнала – выходного регулируемого параметра. Исходя из этого, представляется целесообразным синтезировать все автономные контуры общего мультипликативного регулятора (см. рис. 6.) на основе решения обратных задач динамики соответствующих элементов.

Обобщенная структура астатического регулятора, построенного на решении обратной задачи динамики объекта произвольного динамического порядка, приведена в [6].

В соответствии с принятой математической моделью (1) – (5) и структурной схемой объекта регулирования (см. рис.4), общая структура мультипликативного регулятора должна включать три контура управления объектами третьего динамического порядка (сервоклапан, турбина и компрессор) и один контур управления объектом третьего динамического порядка (гидродвигатель). Структурные схемы таких автономных регуляторов приведены на рис. 5.

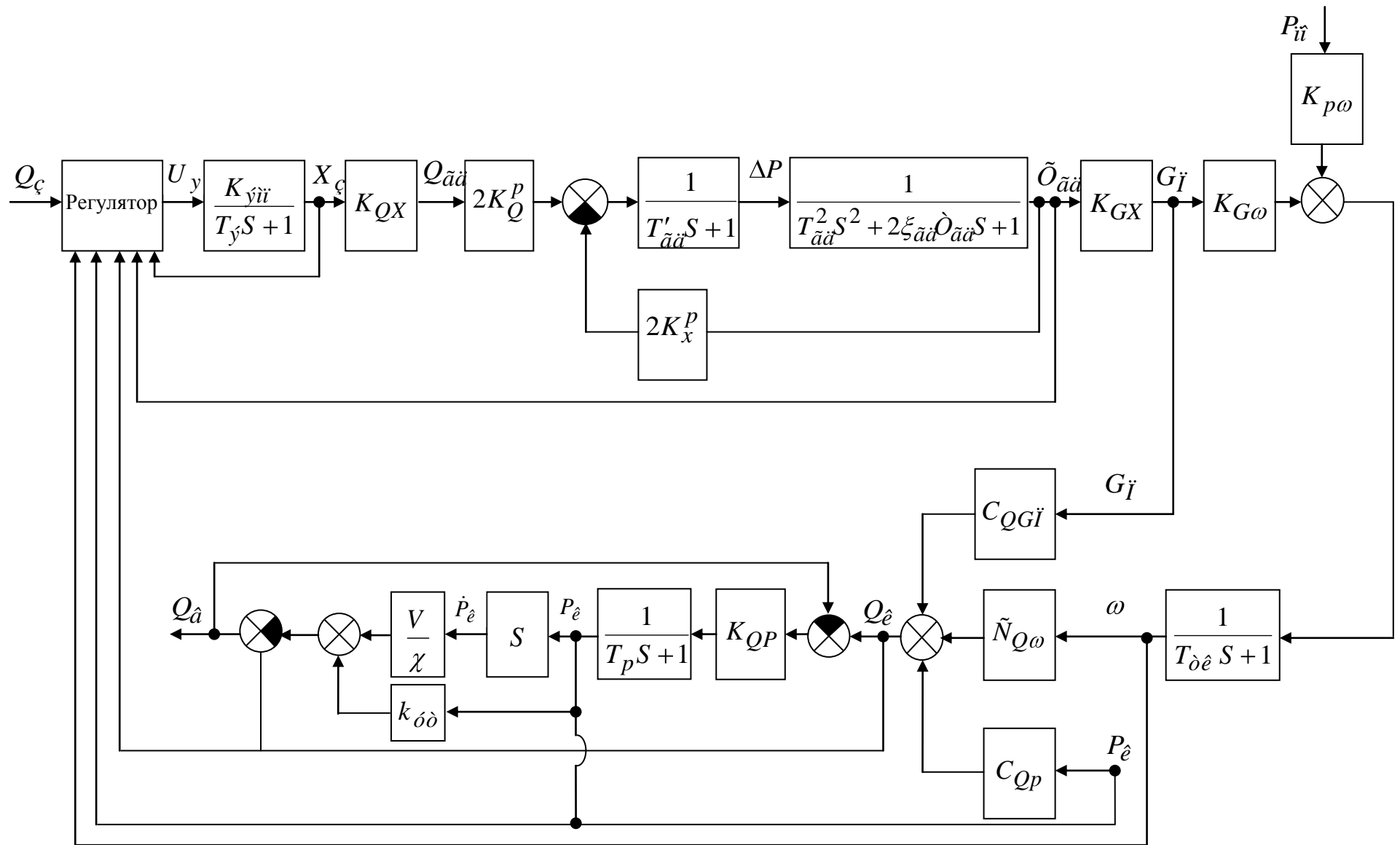


Рис. 3. Структурная схема САУ производительности турбокомпрессорного агрегата

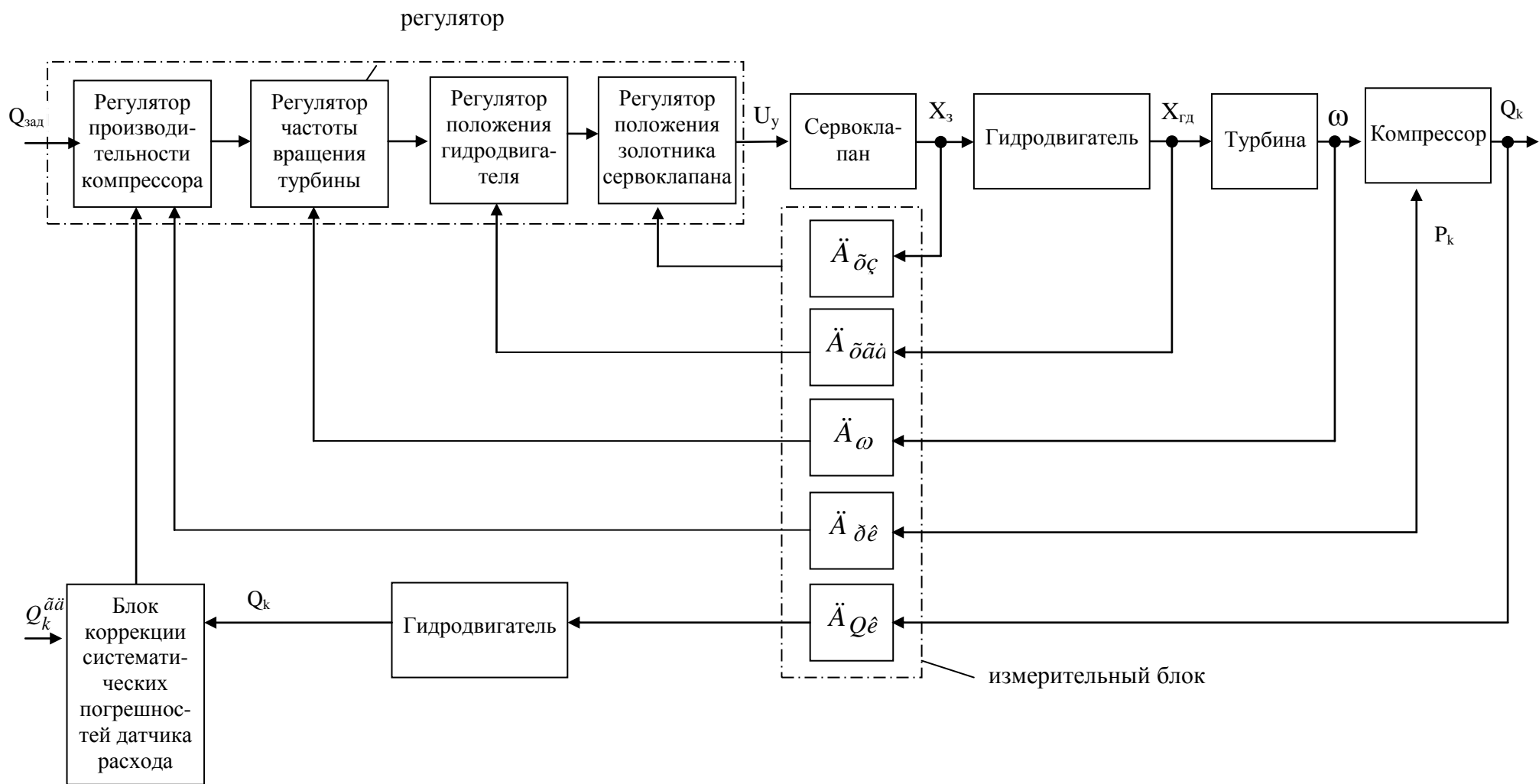
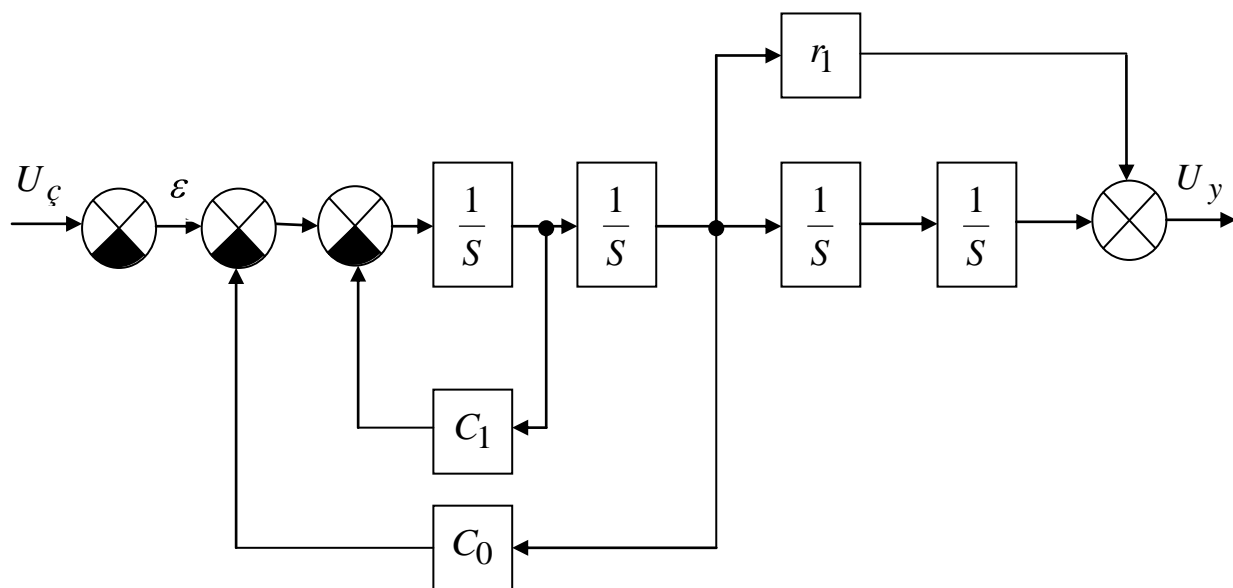
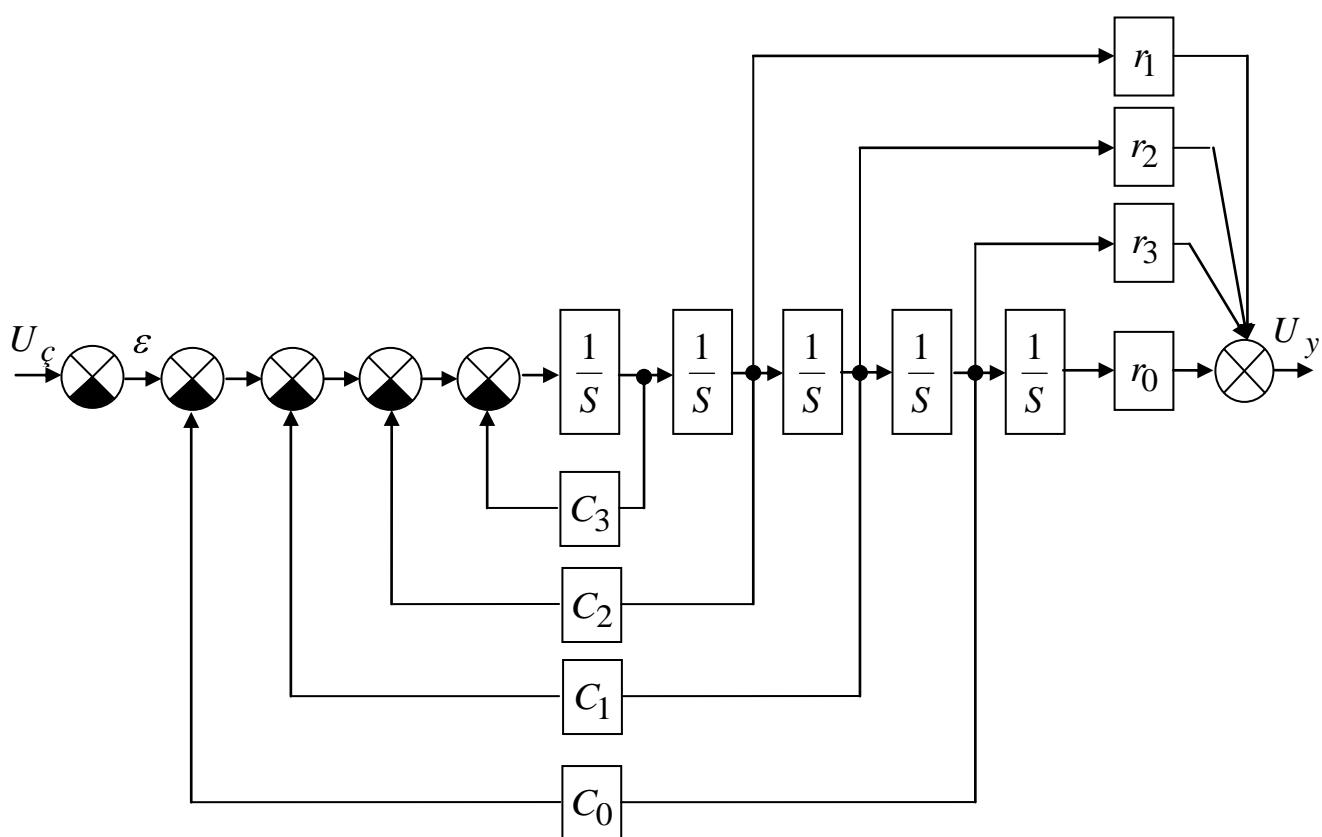


Рис. 4. Общая функциональная схема САУ производительности турбокомпрессорного с прецизионным мультипликативным регулятором



а) для динамического объекта первого порядка



б) для динамического объекта третьего порядка

Рис. 5. Структурные схемы астатических регуляторов, построенных на решении обратных задач динамики



Синтез фильтра Калмана (эталонной модели-наблюдателя) для оценки свободной от случайных возмущений составляющей измерительного сигнала расхода воздуха в воздухопроводе может быть выполнен следующим образом.

Математическая модель воздухопровода может быть представлена в виде:

$$T_p \dot{P}_k + P_k = K_{QP}(Q_k - Q_g); \quad (6)$$

$$\text{где } T_p = V_{\text{воз}} / \lambda_{\text{воз}} K_{\text{ум}}^{603}; \quad Q_{QP} = 1 / K_{\text{ум}}^{603}.$$

Значения давления ( $P_k$ ) и расхода воздуха ( $Q_k$ ) доступны непосредственному измерению при помощи датчика давления и измерителя расхода, установленного на выходе из компрессора.

В соответствии с общей методикой синтеза наблюдателей состояния, изложенной в [6], представим уравнение (6) в типовой дифференциально-матричной форме

$$\dot{\hat{P}}_k = (A - K)\hat{P}_k + B(Q_k - \hat{Q}_g) + KP_k; \quad (7)$$

или

$$\dot{\hat{P}}_k = A\hat{P}_k + K(P_k - \hat{P}_k) + B(Q_k - \hat{Q}_g); \quad (8)$$

где  $A = -1/T_k$ ;  $B = K_{QP}/T_k$  – скалярные элементы матриц объекта и управления.

$K$  – скалярный элемент матрицы весовых коэффициентов наблюдателя состояния (фильтра Калмана).

Структурная схема фильтра, соответствующая уравнениям (18), (19) приведена на рис. 6. Такой фильтр на основе имеющихся реальных измерительных сигналов давления ( $P_k$ ) и расхода ( $Q_k$ ), развиваемых турбокомпрессором, обеспечивает аналитическое значение расхода воздуха в воздухопроводе ( $\hat{Q}_g$ ), свободное от значения случайных возмущений и помех.

В общей структуре прецизионного регулятора для САР производительности турбокомпрессора, включающего унифицированные автономные астатические контуры управления сервоклапаном, гидродвигателем, турбокомпрессором и воздухопроводом на основе решения соответствующих обратных задач динамики (см. рис. 5) для повышения точности основного измерительного сигнала (расхода воздуха) используются электронный блок компенсации систематических погрешностей расходомера, выполняющий сравнение фактического сигнала с эталонной градуировочной характеристикой и дающий соответствующую поправку в сигнал обратной связи (см. рис. 4), а также фильтр Калмана (эталонная модель - наблюдатель) (см. рис. 6), обеспечивающий свободное от случайных возмущений и помех значение расхода воздуха в воздухопроводе.

Для компенсации отрицательного влияния на точность работы электрогидравлического исполнительного механизма статических нелинейных характеристик (положительных перекрытий золотника, сухого трения, люфтов, нечувствительности) в регуляторе положения сервоклапана используется блок коррекции статических нелинейных характеристик [7], обеспечивающий

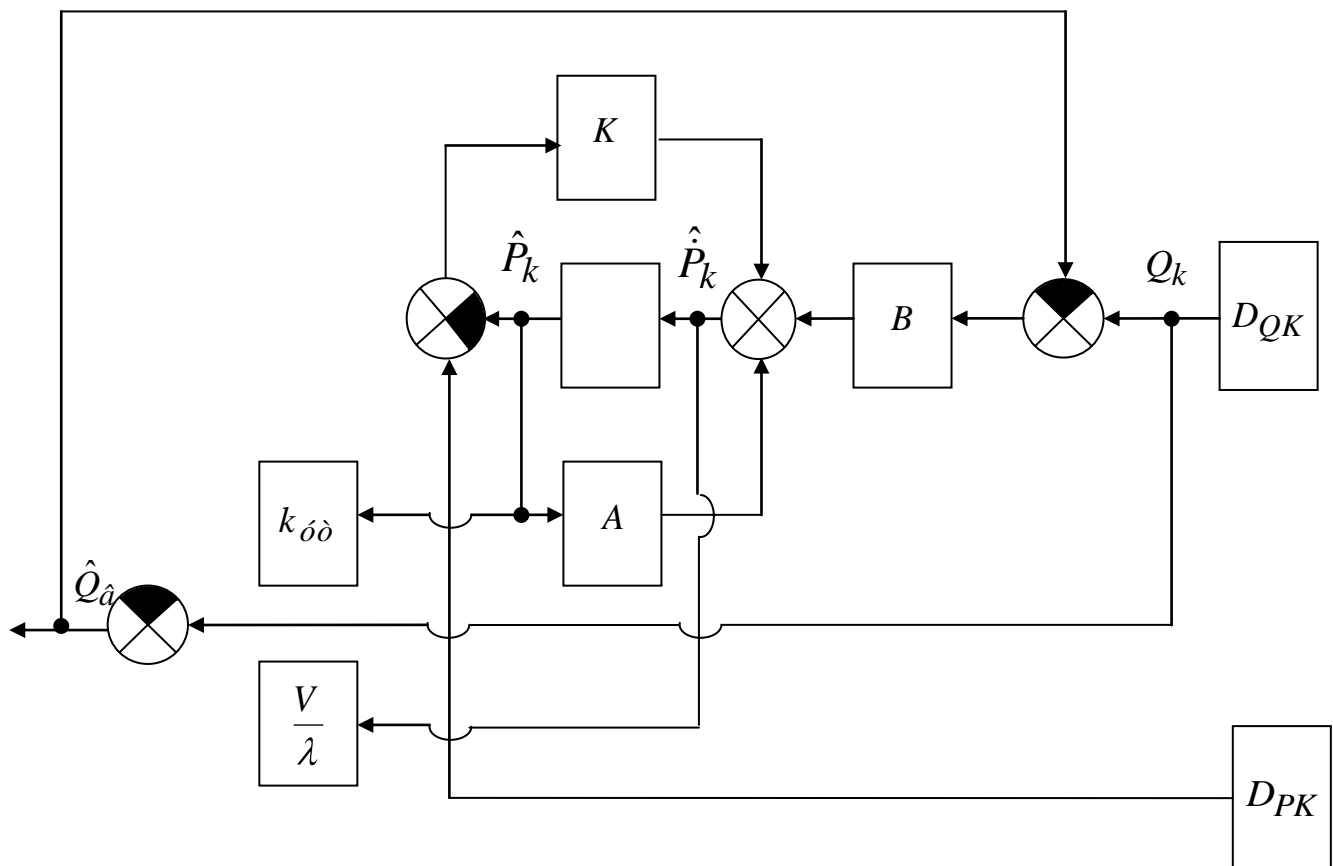


Рис. 6. Структурная схема фильтра Калмана

(эталонной модели-наблюдателя) для воздухопровода

высокие значения общего коэффициента усиления в области малых сигналов и «зону стабилизации» (работу с нулевым коэффициентом усиления) в области перехода к номинальным значениям коэффициента усиления с целью сохранения устойчивости системы.

Предложенная структура регулятора обеспечивает компенсацию всех основных видов погрешностей САР производительности турбокомпрессора, обусловленных астатизмом и статическими нелинейными характеристиками элементов исполнительного механизма, систематическими и случайными погрешностями канала измерения регулируемой величины (расхода воздуха).

## Выводы

1. Разработана принципиальная структурная схема быстродействующей прецизионной САР производительности турбокомпрессорного агрегата на основе электрогидравлического следящего привода с пропорциональным

сервоклапаном и микропроцессорным управлением, прецизионной системы измерения объемного расхода воздуха и эффективных алгоритмов управления, обеспечивающих компенсацию различных видов статических и динамических ошибок.

2. С целью структурного синтеза эффективного регулятора разработана упрощенная линеаризованная математическая модель турбокомпрессорного агрегата, учитывающая основные функциональные связи и параметры, определены все численные значения параметров разработанной модели.

3. С целью упрощения структурного синтеза, практической реализации и настройки предложена структура четырехконтурного мультипликативного регулятора, включающего автономные контуры управления положением золотника сервоклапана, положением гидродвигателя, частотой вращения турбины и производительностью турбокомпрессора.

4. На основе решения обратной задачи динамики объекта управления предложены универсальные структурные схемы алгоритмов управления всеми выделенными автономными контурами.

5. Для оценки свободной от случайных возмущений составляющей измерительного сигнала расхода воздуха в воздухопроводе выполнен структурный синтез фильтра Калмана (эталонной модели-наблюдателя).

6. С целью повышения точности измерения расхода воздуха предложен запатентованный способ компенсации систематических погрешностей измерителя путем сравнения в электронном микропроцессорном блоке фактических значений расхода со значениями эталонной градуировочной характеристики.

7. Предложен запатентованный способ компенсации погрешностей САР, обусловленных статическими нелинейными характеристиками исполнительного механизма (нечувствительность, сухое трение, люфты) путем использование в контуре управления переменного коэффициента усиления с «горизонтальной зоной стабилизации».

8. Предложена общая структурная схема прецизионного регулятора для САР производительности турбокомпрессорного агрегата, обеспечивающая компенсацию всех основных видов статических и динамических погрешностей.

## **Литература**

1. Канюк Г. И., Попов М. А., Кириченко Н. К. Основные направления повышения показателей качества электрогидравлических систем автоматического регулирования производительности турбокомпрессорных агрегатов доменных печей. Вістник національного технічного університету „ХПІ”. Збірник наукових праць – Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ „ХПІ” – 2010. – №46. – с.70-74.

2. Канюк Г. И., Попов М. А. Проблемы повышения точности систем автоматического регулирования турбокомпрессорных агрегатов, используемых в доменном производстве. Матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф., 16-17 вересня 2010 р. «Наука в інформаційному просторі» Т.1: Наукові праці у

галузях: біологія, медицина, геологія та географія, техніка. Дніпропетровськ.: Біла К. О., 2010. – С.71-76.

3. Канюк Г. И., Попов М. А. Проблемы повышения точности систем автоматического регулирования турбокомпрессорных агрегатов. Сборник тезисов II-международной научно-технической конференции «Качество технологий – качество жизни». Украина. Судак. 15-19 сентября 2010 г.- С.81-82.

4. Канюк Г. И., Попов М. А. Основные направления повышения показателей качества электрогидравлических систем автоматического регулирования производительности турбокомпрессорных агрегатов доменных печей. – Материалы XI научно-технической конференции молодых специалистов ПАО «АМК». – Алчевск. – 25 мая 2011. – с.57.

5. Измерения в промышленности. Справ. Изд. В 3-х кн. Кн.2 Способы измерения и аппаратура: Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 384 с.

6. Канюк Г. И. Модели и методы структурного и параметрического синтеза прецизионных электрогидравлических следящих систем автоматизированных испытательных стендов / Рукопись/ Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления / Г.И. Канюк // Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2009.

7. Канюк Г. И., Артюх С. Ф., Попов М. А., Близниченко О. М. Електрогідравлічний слідкуючий привід. Патент України, F15B 9/03 (2006.01), № 61431, Опубл. 25.07.2011 г. Бюл. № 14.

Г. І. Канюк, С. Ф. Артюх, М. А. Попов

### **ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ДОМЕНОГО ВИРОБНИЦТВА ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ І МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ ПОВІТРЯ**

*У статті представлений комплекс технічних рішень, сприяючих підвищенню точності і швидкодії САР продуктивності турбокомпресорного агрегату і як наслідок, – підвищення ефективності і якості технологічного процесу доменної виплавки чавуну. Також запропоновані запатентовані способи компенсації похибок систем регулювання і метрологічного забезпечення.*

**Ключові слова:** доменне виробництво, турбокомпресорні агрегати, електрогідравлічна система регулювання, метрологічне забезпечення.

G. Buzzard, S. Artyukh, M. Popov

### **IMPROVING THE QUALITY OF PRODUCTION DOMAIN THROUGH IMPROVEMENTS OF AUTOMATIC CONTROL AND METROLOGY ASSURANCE OF SUPPLY AIR**

*In article the complex of the technical decisions promoting increase of accuracy and speed CAP of productivity турбокомпрессорного of the unit and as consequence – increase of efficiency and quality of technological process of domain melt of pig-iron is presented. Also the patented ways of indemnification of systems of regulation and metrological maintenance are offered.*

**Key words:** domain manufacture, turbo-compressor units, electrohydraulic system of regulation, metrologists-chesky maintenance, accuracy, speed.

### **Сведения об авторах**

1. Канюк Геннадий Иванович, Украинская инженерно-педагогическая академия, профессор, доктор технических наук, ул. Университетская, 16, кафедра «Теплоэнергетика и энергосбережения» тел. 099-68-576-82.

2. Артюх Станислав Федорович, Харьковский политехнический институт, профессор, доктор технических наук, тел. 050-301-98-85.

3. Попов Максим Анатольевич, ОАО «Алчевский металлургический комбинат», магистр, Луганская обл., м. Миусинск, , ул. Совхозная, д.41, кв.1  
ОАО «Алчевский металлургический комбинат», тел. 095-170-53-33.