УДК 621.365.22

Николаев А.А., Тулупов П.Г.

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ СВЕРХМОЩНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ДСП-250

В данной статье рассмотрена усовершенствованная система управления гидравлическим приводом перемещения электродов ДСП-250 (ЗАО «ММК-Metalurji», г. Искендерун, Турция). Проведён анализ недостатков существующей системы управления HIREG (Danieli, Италия), установленной на ДСП-250. Предложена структура усовершенствованного пропорционального регулятора адмитанса, внедрение которого позволит существенно упростить процесс настройки, уменьшить число уникальных характеристик регулятора, а также улучшить динамические показатели качества работы системы.

Ключевые слова: электродуговая сталеплавильная печь, система управления перемещением электродов, адаптивный регулятор адмитанса, математическая модель электрического контура дуговой печи, электрическая дуга, гидропривод перемещения электродов.

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в металлургической отрасли промышленности стран СНГ и зарубежья наблюдается тенденция роста объёмов производства жидкой стали в высокопроизводительных электродуговых сталеплавильных печах (ДСП) с последующей внепечной обработкой в установках ковш-печь (УКП). При реструктуризации старых электросталеплавильных цехов, а также при освоении новых производственных чаще всего предпочтение отдаётся именно мощным и сверхмощным ДСП ввиду экологичности и высоких показателей энергоэффективности.

Очевидно, что электротермические установки подобного рода характеризуются существенным энергопотреблением. Внутризаводские показатели удельного расхода электроэнергии для электросталеплавильных цехов могут превышать 50%. Вследствие этого особую актуальность приобретает задача сокращения энергопотребления за счёт оптимизации процесса плавки.

Одним из путей решения данной задачи является усовершенствование системы управления гидравлическим приводом перемещения электродов путём внедрения новых алгоритмов. В настоящее время сегмент рынка, связанный с разработкой систем управления процессом плавки в ДСП, практически полностью занят зарубежными производителями, такими как Mitsubishi Heavy Industries (бывший Siemens VAI; системы ARCOS и Simelt), Danieli (система HIREG), Amec Spie (система E.M.P.E.R.E) и др.

При этом существующие системы обладают рядом недостатков, а также в существенной мере закрытой структурой, что делает адаптацию системы под изменяющиеся производственные условия без привлечения иностранных специалистов достаточно сложной задачей. Таким образом, разработка новой системы управления перемещением электродов, более гибкой в настройке и лишённой недостатков существующих систем, позволит повысить энергоэффективность установки за счёт более стабильных режимов горения электрических дуг.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ HIREG (DANIELI, ИТАЛИЯ)

В качестве объекта данного исследования выбрана самая мощная в мире электродуговая сталеплавильная печь ДСП-250, расположенная на базе ЭСПЦ ЗАО «ММК-Metalurji» (г. Искендерун, Турция). На ДСП-250 установлена система управления HIREG (Danieli, Италия), структура которой является двухуровневой. Система управления первого уровня реализует переключение ступени печного трансформатора и реактора в соответствии с профилем плавки. Это позволяет регулировать объём электрической энергии, вводимой в печь, путём изменения формы кривой электрической характеристики, что наглядно продемонстрировано на **рис. 1**.

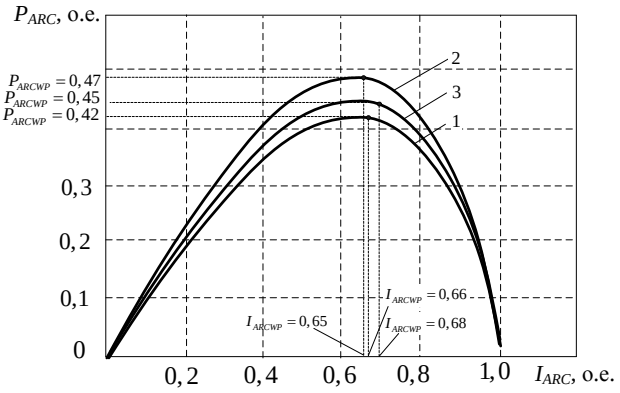


Рис. 1. Электрические характеристики ДСП-250 при различных комбинациях ступеней трансформатора и реактора на разных стадиях плавки: 1 – проплавление колодцев и образование «болота» (Nтр=8; Nр=6; Nрк=4); 2 – основной период расплавления (Nтр=10; Nр=6; Nрк=4); 3 – окисление и нагрев (Nтр=9; Nр=6; Nрк=4)

Тем не менее данный способ регулирования является медленным (одно переключение занимает около 30 с). Кроме того, слишком частые коммутации недопустимы ввиду преждевременного износа устройства РПН. Вследствие этого для отработки возмущающих воздействий в виде мгновенного изменения длины дуги, а также регулирования рабочей точки в пределах одной кривой электрической характеристики используется система управления второго уровня. Данная система построена на основе гидравлического привода перемещения электродов, функциональная схема которого представлена на **рис. 2** [1].

В системе HIREG параметром регулирования рабочей точки является значение адмитанса фазы электрического контура ДСП, которое вычисляется в соответствии со следующей формулой:

$$Y_{2ф} = I_{ARC} / U_{2ф}, \qquad (1)$$

где I_{ARC} – действующее значение тока дуги; $U_{2ф}$ – действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке печного трансформатора.

Таким образом, система управления первого уровня, в соответствии с профилем плавки, формирует сигнал адмитанса задания, который однозначно определяет рабочую точку на электрической характеристике и жёстко привязан к номеру рабочей кривой.

Структура регулятора адмитанса является пропорционально-интегральной (**рис. 3**). На вход регулятора поступает ошибка регулирования ΔY, рассчитанная на основании сигнала задания и сигнала, поступающего с цепей обратной связи по адмитансу. Коэффициент усиления пропорциональной части формируется в соответствии с величиной ошибки ΔY, ступенью трансформатора N_{TR} и реактора N_R, а также номером рабочей кривой N_{OC}. На выходе регулятора предусмотрен блок компенсации мёртвой зоны сервоклапана, который позволяет ликвидировать нарастающую статическую ошибку в контуре регулирования [2,3].

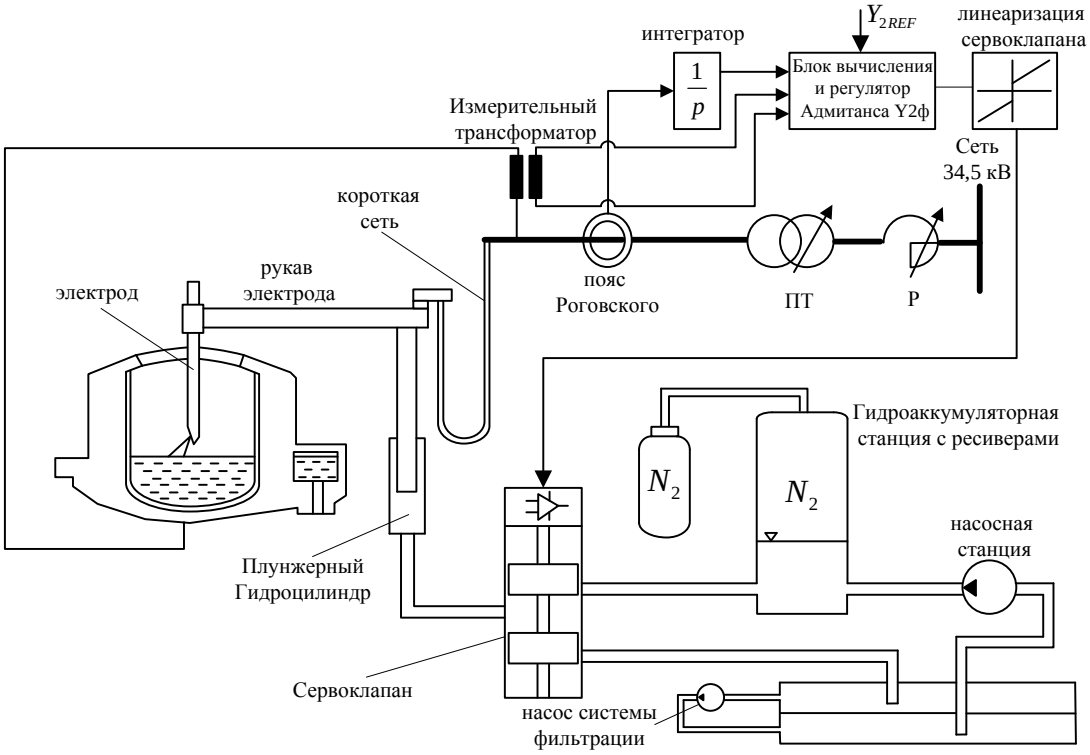


Рис. 2. Функциональная схема системы управления гидроприводом перемещения электродов ДСП-250

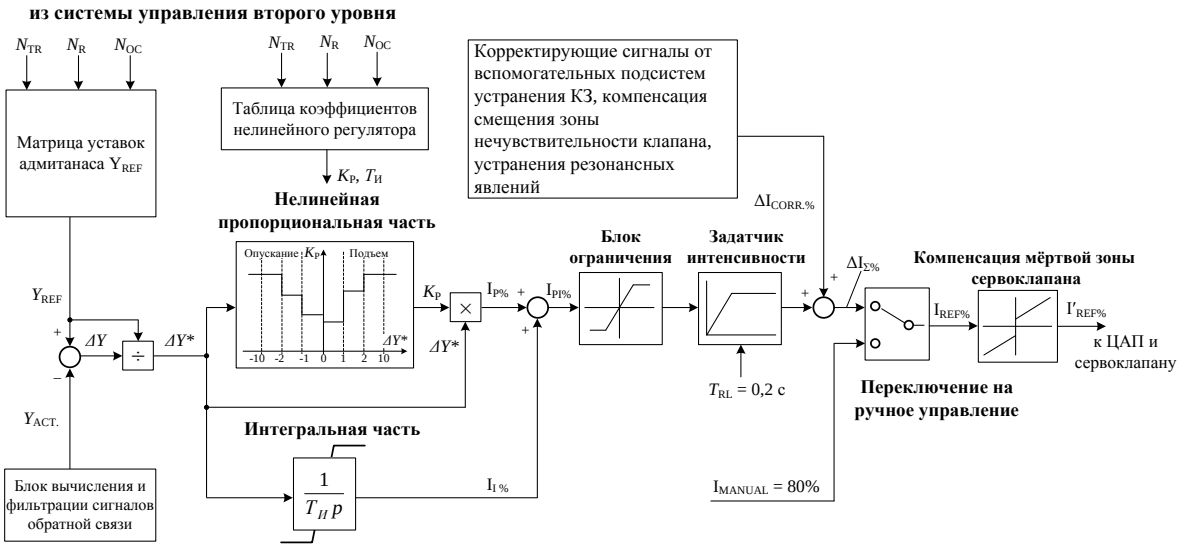


Рис. 3 Структурная схема регулятора адмитанса в системе HIREG

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ДСП-250

Структура нелинейного регулятора адмитанса, представленная на **рис. 3**, имеет ряд недостатков. В первую очередь следует отметить, что коэффициент усиления пропорциональной части регулятора имеет привязку к ступени трансформатора, реактора и номеру рабочей кривой. Это обуславливает наличие большого числа уникальных характеристик, что наряду с закрытостью алгоритмов построения данных характеристик делает настройку регулятора достаточно сложным процессом. Для того чтобы устранить данные недостатки, необходимо провести анализ контура регулирования и разработать усовершенствованный адаптивный регулятор с меньшим количеством уникальных линеаризующих характеристик, структурная схема контура регулирования адмитанса которого представлена на **рис. 4**.

Контур регулирования адмитанса включает в себя две основные нелинейности. Первая нелинейная характеристика относится непосредственно к электрическому контуру. Вторая нелинейность обусловлена нелинейными характеристиками гидропривода перемещения электродов. Если учитывать, что число ступеней печного трансформатора [4] равно 16, а число ступеней реактора – 12, то в общей сложности число уникальных характеристик будет равно 192. Данные характеристики можно получить на основании математической модели электрического контура ДСП-250 с гидроприводом перемещения электродов (**рис. 5**).

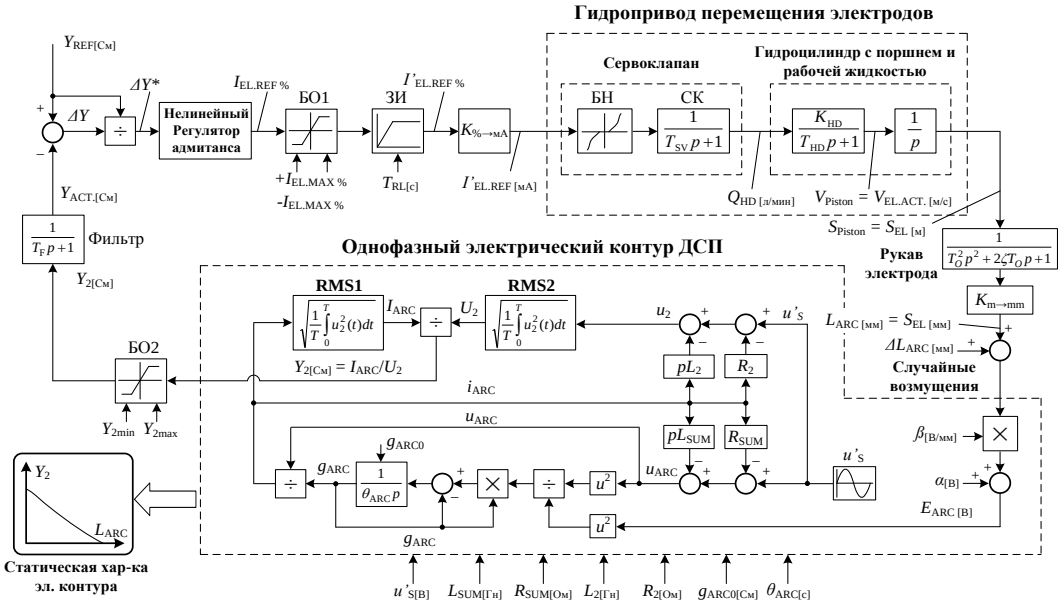


Рис. 4. Структурная схема контура регулирования адмитанса ДСП-250

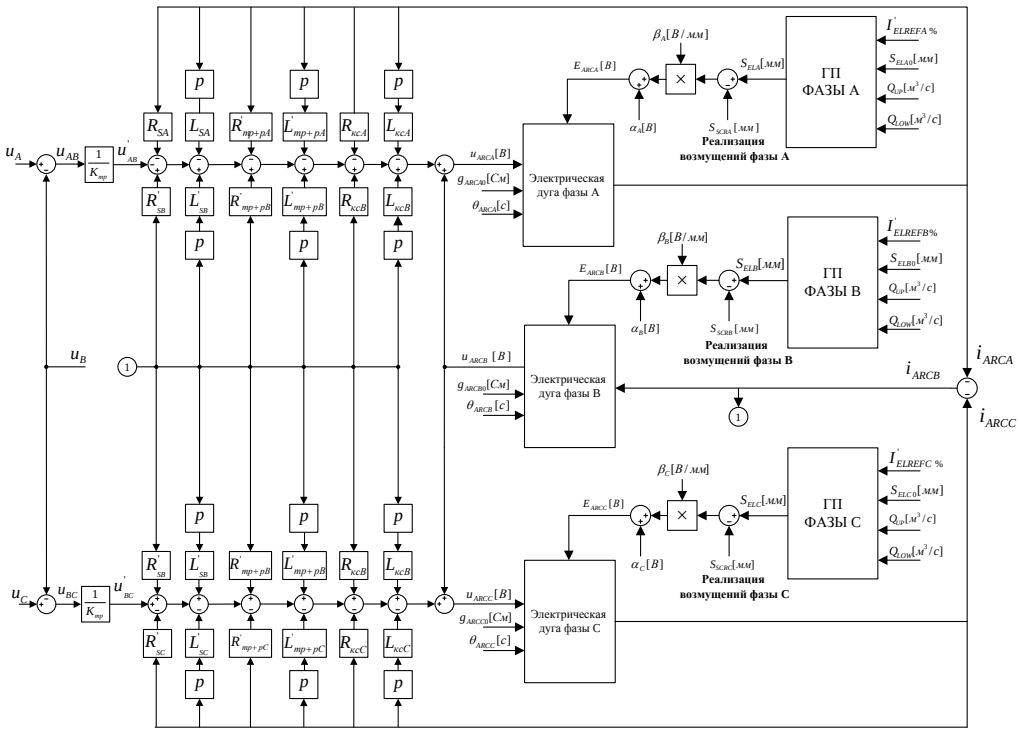


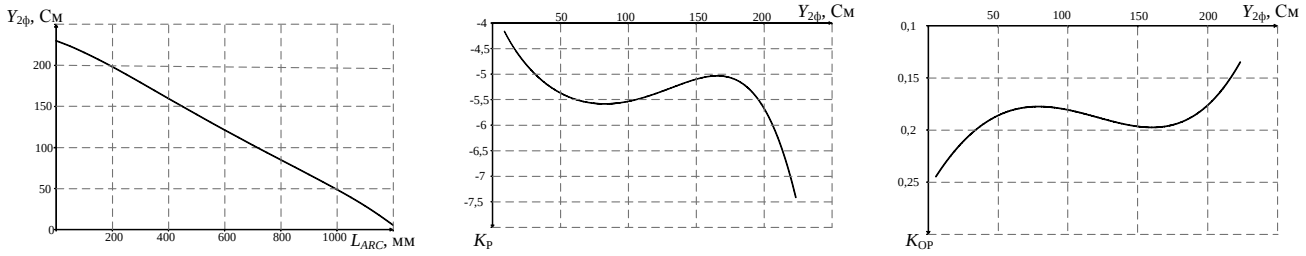
Рис. 5. Структурная схема электрического контура ДСП-250 с гидравлическим приводом перемещения электродов

В качестве примера на **рис. 6, *а*** приведена характеристика электрического контура [5,6], представленная функцией $Y_{2ф}$=f(L_{ARC}). Данная характеристика получена для ступени трансформатора $N_{ТР}$=10 и ступени реактора $N_Р$=6. Поскольку данная характеристика является нелинейной, изменение величины длины дуги L_{ARC} будет приводить к изменению коэффициента усиления электрического контура $K_Р$. Данный коэффициент определяется в соответствии с первой производной от функции $Y_{2ф}$=f(L_{ARC}), график которой представлен на **рис. 6, *б***. Компенсация усилительных свойств электрического контура производится с помощью линеаризующей характеристики $K_{ОР}$=f($Y_{2ф}$), приведённой на **рис. 6, *в***. Последняя характеристика может быть получена в соответствии со следующей формулой:

$$K_{ОР}\left(Y_{2ф}\right)=\frac{1}{K_Р\left(Y_{2ф}\right)}. \qquad (2)$$

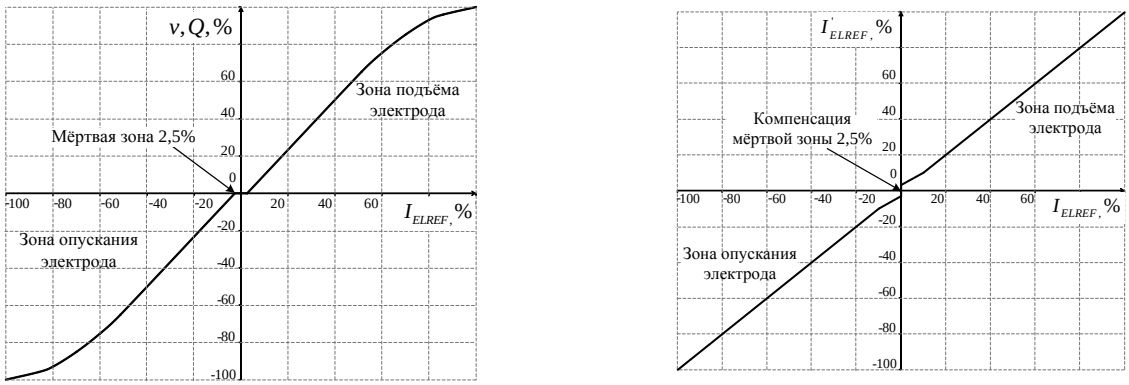
Вторая нелинейная характеристика, как было сказано ранее, относится к регулировочной характеристике сервоклапана, которая имеет мёртвую зону, а также участки нелинейности в диапазоне высоких скоростей перемещения электродов (**рис. 7, *а***). Наличие в контуре звена с мёртвой зоной приводит к появлению нарастающей статической ошибки при регулировании адмитанса. Для того чтобы ликвидировать влияние мёртвой зоны на показатели качества регулирования, внедряется компенсационная характеристика, представленная на **рис. 7, *б***.

Подобный подход к линеаризации актуален только для системы HIREG, поскольку коэффициент, компенсирующий участки нелинейности при заходе в диапазон высоких скоростей, заложен в таблицу коэффициентов нелинейного регулятора. Применение усовершенствованного подхода к линеаризации подразумевает компенсацию как мёртвой зоны, так и нелинейных участков в диапазоне высоких скоростей в рамках одной характеристики, представленной на **рис. 7, *в***.

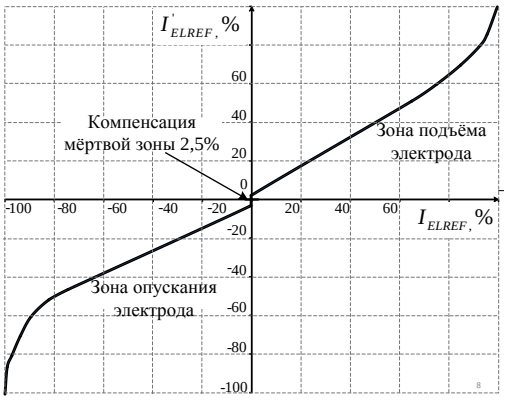


а ***б*** ***в***

Рис. 6. Статические и линеаризующие характеристики электрического контура ДСП-250:
а – нелинейная характеристика электрического контура Y_{ACT} =f(L_{ARC}); б – характеристика коэффициента усиления электрического контура $K_Р$=f($Y_{2ф}$); в – линеаризующая характеристика $K_{ОР}$=f($Y_{2ф}$)



а ***б***



в

Рис. 7. Статические и линеаризующие характеристики гидравлического контура ДСП-250:
а – нелинейная характеристика сервоклапана Q=f(I_{ELREF}); б – линеаризующая характеристика сервоклапана в системе HIREG; в - линеаризующая характеристика сервоклапана в усовершенствованной системе управления

Таким образом, на основании вышеприведённого теоретического анализа разработана структура усовершенствованного адаптивного пропорционального регулятора адмитанса (**рис. 8**). Данный регулятор является чётырёхуровневым, поскольку результирующий коэффициент усиления может быть представлен как произведение четырёх составляющих:

1) $K0=I'_{ELREF}/I_{ELREF}$ – коэффициент усиления линеаризующей характеристики сервоклапана (см. **рис. 7, *в***);

2) $K1=Y'_{REF}$ – коэффициент, учитывающий приведение сигнала ошибки к безразмерной величине;

3) $K2=K_{OP}$ – коэффициент линеаризующей характеристики электрического контура ДСП (см. **рис. 6, *в***);

4) $K3$ – коэффициент, учитывающий свойства блоков приведения единиц измерения, градиента напряжения дугового столба β, а также некомпенсируемые постоянные времени контура регулирования.

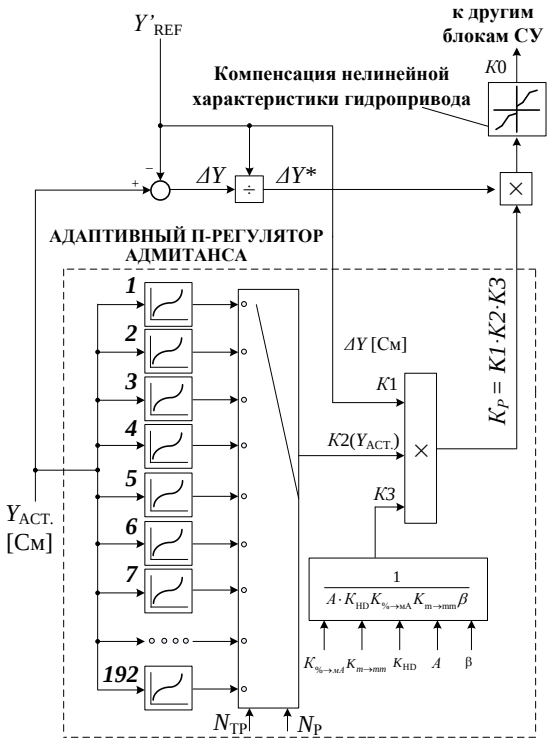


Рис. 8. Структурная схема усовершенствованного П-регулятора адмитанса

В качестве пояснения к 4 пункту отметим, что система регулирования адмитанса достаточно инерционна и не предназначена для компенсации колебаний с частотой, превышающей 1,5-3 Гц. Вследствие этого основные постоянные времени контура, такие как постоянная времени задатчика интенсивности T_{RL}=0,2 с, постоянная времени сервоклапана T_{SV}=0,005 с, постоянная времени гидравлического цилиндра T_{HD}=0,2 с, постоянная времени рукава электрода как колебательного звена T_0=0,0455 с, постоянная времени электрического контура $T_{ЭЛ}$, постоянная времени блока вычисления среднеквадратичного значения T_{RMS}=0,007 с, а также тепловая постоянная времени дуги θ_{ARC} и постоянная времени фильтра T_F, остаются некомпенсируемыми.

Подобная структура регулятора позволяет уменьшить число уникальных характеристик в 6 раз, поскольку его результирующий коэффициент усиления не зависит от номера рабочей кривой [7]. Математическое моделирование показало, что усовершенствованная система управления обеспечивает стабильные переходные процессы как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям в виде случайного изменения длины дуги в фазе *A* на 100 мм (**рис. 9, *а***). При этом коэффициент взаимовлияния между фазами достаточно мал, поскольку изменение сигнала задания и возмущающие воздействия в фазе *A* оказывают незначительное влияние на установившееся значение длины дуги в фазах *B* и *C* (**рис. 9, *б***). Кроме того, линеаризующие характеристики электрического контура данного регулятора имеют явную связь с параметрами объекта, что наряду с разделением компенсационных характеристик электрического и гидравлического контура делает настройку параметров регулятора более понятной и простой.

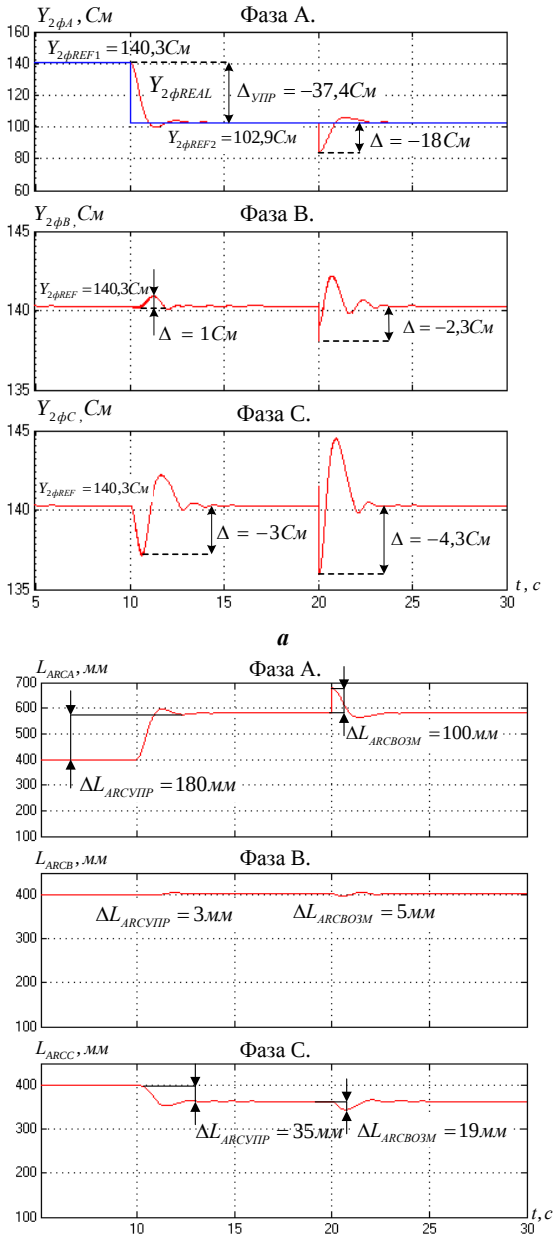


Рис. 9. Реакция системы управления на управляющее и возмущающее воздействие в виде мгновенного изменения длины дуги в фазе А на 100 мм: а - по адмитансу; б - по длине электрической дуги

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Структура ПИ-регулятора адмитанса системы управленчия положением электродов HI-REG, установленной на ДСП-250, обладает достаточно сложной структурой ввиду закрытых алгоритмов настройки нелинейного регулятора, а также большого числа уникальных характеристик. Кроме того, в данном регуляторе совмещены коэффициенты, компенсирующие усилительные свойства электрического контура ДСП, а также сервоклапана в диапазоне высоких скоростей. Вследствие этого адаптация линеаризующей характеристики сервоклапана в соответствии с актуальной регулировочной характеристикой является достаточно сложной задачей.

2. Недостатки существующей системы можно компенсировать путём внедрения усовершенствованного адаптивного пропорционального регулятора адмитанса. Число уникальных характеристик данного регулятора сокращено в 6 раз ввиду отсутствия жёсткой привязки к номеру рабочей кривой. Помимо этого, его структура подразумевает полное разделение линеаризующих характеристик электрического и гидравлического контура, а также отсутствие ступенчатого изменения результирующего коэффициента усиления, что позволит существенно упростить процесс настройки и улучшить динамические показатели качества работы системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев А.А., Тулупов П.Г. Исследование гидропривода перемещения электродов сверхмощной электродуговой сталеплавильной печи ДСП-250 ЗАО «ММК Metalurji», г. Искендерун, Турция // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. трудов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. Вып.1. С.84-95.

2. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов печь-ковш / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулупов, И.А. Якимов, Е.В. Повелица, А.В. Ануфриев // Электротехника: сетевой электронный научный журнал [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://electrical-engineering.ru/, свободный. Т.1. С 48-58, 2014.

3. Николаев А.А., Тулупов П.Г. Особенности моделирования гидропривода перемещения электродов сверхмощной электродуговой сталеплавильной печи ДСП-180 // Инновации в науке: сб.статей по материалам XXVII международной научно-практической конференции. Новосибирск: СибАК, 2013. №27. С.53-61.

4. Исследование перенапряжений при коммутации печного трансформатора электродуговой установки с помощью вакуумного выключателя / А.А. Николаев, Ф.Ф. Урманова, А.А. Сатосова, П.Г. Тулупов // Инновации в науке: сб. статей по материалам XLIV международной научно-практической конференции. Новосибирск: СибАК, 2015. №4(41). С.40-51.

5. Управление тепловым и электрическим режимами агрегата ковш-печь / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, М.М. Ерофеев, А.А. Николаев // Электрометаллургия. 2006. №6. С. 11-16.

6. Способы управления электрическим режимом электродуговых печей / Ю.П. Журавлёв, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, А.А. Николаев, Е.Б. Агапитов // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. №4. С.76-80.

7. Electrical Optimization of Superpowerful Electric Arc furnaces / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.В. Ануфриев // Steel in Translation. 2014. Т.44. №4.

8. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов, И.А. Якимов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им.Г.И. Носова. 2013. №1(41). С.76-82.

9. Исследование электрических режимов сверхмощной дуговой сталеплавильной печи дсп-250 металлургического завода "MMK-Metalurji" (г. Искендерун, Турция) / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов, А.В. Ануфриев // Труды XII Международного конгресса сталеплавильщиков. 2013. С.87-89.

10. Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулупов, Е.В. Повелица // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им.Г.И. Носова. 2015. №2(50). С.90-100.

11. Моделирование электрического контура дуговой печи / Г.П. Корнилов, А.Ю. Мещеряков, А.А. Николаев, И.А. Якимов, Т.Р. Храмшин // Электротехнические системы и комплексы. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова. 2006. №12. С.110.

12. Математическая модель электрического контура дуговой сталеплавильной печи с реализацией случайных возмущений электрических дуг / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.В. Ануфриев, Е.В. Повелица // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2014. №4(4). С.260-271.

13. Пути совершенствования динамических характеристик дуговых сталеплавильных печей / И.А. Якимов, А.А. Николаев, Д.А. Корнилов, Г.П. Корнилов, А.В. Ануфриев, В.С. Горбунов, Е.В. Прудников // Электротехнические системы и комплексы. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова. 2010. №1. С.233

14. Оптимизация электрических режимов сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов, А.В. Ануфриев // Электротехнические системы и комплексы, Изд. Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2012, №20, с.274-279

15. Повышение эффективности работы сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Шеметов А.Н., Якимов И.А. // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. №1. С.55-99.

16. Управление тепловым и электрическим режимами агрегата ковш-печь / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, М.М. Ерофеев, А.А. Николаев // Электрометаллургия. 2006. №6. С.11-16.

17. Анализ и оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов // Электрометаллургия. 2013. №7. С.2-10.

18. Развитие системы управления электродуговой установкой ковш-печь с целью повышения эффективности нагрева / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, М.М. Ерофеев, Ю.П. Журавлёв, А.П. Мусиенко // Изв. вузов. Электромеханика. 2006, №4, с.81-84.

19. Основные резервы повышения производительности электродуговой печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов, Е.В. Повелица, А.В. Ануфриев, Т.Е. Пелагеин, В.А. Иванов, Т.Р. Храмшин / Электротехнические системы и комплексы. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2011. №1. С.89-95.

20. Николаев А.А., Корнилов Г.П., Якимов И.А. Оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей // Электрометаллургия. 2014. №5. С.15-22.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF THE IMPROVED CONTROL ALGORITHMS FOR ULTRA-HIGH POWER ELECTRIC ARC FURNACE EAF-250 ELECTRODE MOTION SYSTEM

Nikolaev A.A., Tulupov P.G.

The article describes the improved system for control the hydraulic drive of the EAF-250 electrodes motion (OJSC «MMK Metalurji», Iskenderun, Turkey). The analysis of the disadvantages of existing control system HIREG (Danieli, Italy), which is installed on the EAF-250, was reviewed. The structure of improved proportional admittance control, which implementation will allow to simplify the setup process, to reduce the number of unique characteristics of the control, and also to improve the dynamic characteristics of the system work quality was provided.

Keywords: electric arc furnace, electrode position control system, adaptive admittance control, mathematical model of the arc furnace electrical circuit, electric arc, electrode motion hydraulic drive.

REFERENCES

1. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. *Issledovanie gidroprivoda peremeshcheniya elektrodov sverhmoshchnoy elektrodugovoy staleplavil'noy pechi DSP-250 ZAO «MMK Metalurji», g. Iskenderun, Turtsiya* [Investigation of a hydraulic drive of the ultra-high power electric arc furnace EAF-250 CJSC «MMK Metalurji» in Iskenderun,Turkey]. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy* [Energetical and electrotechnical systems], collection of papers, Magnitogorsk, Publ. Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, pp.84-95.

2. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Tulupov P.G., Yakimov I.A., Povelitsa E.V., Anufriev A.V. *Razrabotka usovershenstvovannoy sistemy avtomaticheskogo upravleniya polozheniem elektrodov dugovyh staleplavil'nyh pechey i agregatov pech'-kovsh* [Design of the improved automatic control system of electric arc furnace and ladle furnaces electrodes' position]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, part 1, pp. 48 -58.

3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. *Osobennosti modelirovaniya gidroprivoda peremeshcheniya elektrodov sverhmoshchnoy elektrodugovoy staleplavil'noy pechi DSP-180* [Simulation features of hydraulic drive of extra-power electric arc furnace EAF-180 electrodes movement]. *Innovatsii v nauke: sb.statey po materialam XXVII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovations in science: XXVII international scientific conference]. Novosibirsk, publ. «SIBaK», 2013, no.27. pp.53-61.

4. Nikolaev A.A., Urmanova F.F., Satosova A.A., Tulupov P.G. *Issledovanie perenapryazheniy pri kommutatsii pechnogo transformatora elektrodugovoy ustanovki s pomoshch'yu vakuumnogo vyklyuchatelya* [Research of high voltages caused by furnace transformer commutation of electric arc equipment using the vacuum switch]. *Innovatsii v nauke: sb. statey po materialam XLIV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovations in science: XLIV international scientific conference]. Novosibirsk, publ. «SIBaK», 2015, no.4(41), pp.40-51.

5. Agapitov E.B., Kornilov G.P., Hramshin T.R., Erofeev M.M., Nikolaev A.A. *Upravlenie teplovym i jelektricheskim rezhimami agregata kovsh-pech'* [Control of the thermal and electrical ladle furnaces regimes]. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2006, no.6, pp. 11-16.

6. Zhuravljov Ju.P., Kornilov G.P., Hramshin T.R., Nikolaev A.A., Agapitov E.B. *Sposoby upravlenija jelektricheskim rezhimom jelektrodugovyh pechej* [The ways of control the electrical regimes of arc furnaces]. *Izv. vuzov. Elektromehanika* [Proceedings of the higher educational institutions. Electromechanics], 2006, no.4, pp. 76-80.

7. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V. Electrical Optimization of Superpowerful Electric Arc furnaces. Steel in Translation, 2014 , T.44, no.4, pp. 289.

8. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Hramshin T.R., Vahitov T.Yu., Yakimov I.A. *Osobennosti modelirovaniya dugovoy staleplavil'noy pechi kak elektrotekhnicheskogo kompleksa* [Features of the electric arc furnace modeling as an electrotechnical complex]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im.G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no.1(41), pp.76-82.

9. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Hramshin T.R., Vahitov T.Yu., Anufriev A.V. *Issledovanie elektricheskih rezhimov sverhmoshchnoy dugovoy staleplavil'noy pechi dsp-250 metallurgicheskogo zavoda "MMK-Metalurji" (g. Iskenderun, Turtsiya)* [Research of the electrical regimes of ultra high-power electric arc furnace EAF-250 of the "MMK-Metalurji" metallurgical plant (Iskenderun, Turkey)]. *Trudy XII Mezhdunarodnogo kongressa staleplavil'shchikov* [Proceedings of the XII International steelmakers congress], 2013, pp.87-89.

10. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Tulupov P.G., Povelitsa E.V. *Analiz razlichnyh variantov postroeniya sistem avtomaticheskogo upravleniya peremeshcheniem elektrodov dugovyh staleplavil'nyh pechey i ustanovok kovsh-pech'* [Research of the different methods for design automated control systems of an electrode position for electric arc furnaces and ladle furnaces]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im.G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], Magnitogorsk, 2015, no.2(50), pp.90-100.

11. Kornilov G.P., Meshcheryakov A.Yu., Nikolaev A.A., Yakimov I.A., Hramshin T.R. *Modelirovanie elektricheskogo kontura dugovoy pechi* [Simulation of the arc furnace electrical circuit]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechical Systems and Complexes], 2006, no.12, pp.110.

12. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Povelitsa E.V. *Matematicheskaya model' elektricheskogo kontura dugovoy staleplavil'noy pechi s realizatsiey sluchaynyh vozmushcheniy elektricheskih dug* [The mathematical model of electric arc furnace's electric circuit with realization of the electric arcs' random disturbances]. *Prilozhenie matematiki v ehkonomicheskih i tekhnicheskih issledovaniyah* [The application of mathematics in economic and technical researches], 2014, no.4(4), pp.260-271.

13. Yakimov I.A., Nikolaev A.A., Kornilov D.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Gorbunov V.S., Prudnikov E.V. *Puti sovershenstvovaniya dinamicheskih harakteristik dugovyh staleplavil'nyh pechey* [The ways to improve dynamical characteristics of the electric arc furnaces]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes], 2010, no.1, pp.233.

14. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Hramshin T.R., Vahitov T.YU., Anufriev A.V. *Optimizatsiya elektricheskih rezhimov sverhmoshchnoy dugovoy staleplavil'noy pechi* [Optimization of the electrical regimes for ultra-high power electric arc furnace]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes], 2012, no.20, pp.274-279.

15. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Hramshin T.R.,

Shemetov A.N., Yakimov I.A. *Povyshenie effektivnosti raboty sverhmoshchnoy dugovoy staleplavil'noy pechi* [Increasing of the work efficiency for ultra-high power electric arc furnace]. *Izv. vuzov. Elektromehanika* [Proceedings of the higher educational institutions. Electromechanics], 2009. no.1, pp.55-99.

16. Agapitov E.B., Kornilov G.P., Hramshin T.R., Erofeev M.M., Nikolaev A.A. *Upravlenie teplovym i elektricheskim rezhimami agregata kovsh-pech* [Control of the electrical and thermal regimes for ladle furnaces]. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2006, no.6, pp. 11-16.

17. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Hramshin T.R., Vahitov T.Yu. *Analiz i optimizatsiya elektricheskih rezhimov sverhmoshchnyh dugovyh staleplavil'nyh pechey* [Analysis and optimization of the electrical regimes for ultra-high power electric arc furnaces]. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2013, no.7, pp. 2-10.

18. Agapitov E.B., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Erofeev M.M, Zhuravlyov Yu.P., Musienko A.P. Razvitie *sistemy upravleniya elektrodugovoy ustanovkoy kovsh-pech' s tsel'yu povysheniya effektivnosti nagreva* [Improving of the ladle furnace control system for increasing the heating efficiency]. *Izv. vuzov. Elektromehanika* [Proceedings of the higher educational institutions. Electromechanics], 2006, no.4, pp. 81-84.

19. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., YAkimov I.A., Povelitsa E.V., Anufriev A.V., Pelagein T.E., Ivanov V.A., Hramshin T.R. *Osnovnye rezervy povysheniya proizvoditel'nosti elektrodugovoy pechi kak elektrotekhnicheskogo kompleksa* [The ways to increase productivity of the electric arc furnace as an electrotechnical system]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes], 2011, no.1, pp. 89-95.

20. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Yakimov I.A. *Optimizatsiya elektricheskih rezhimov sverhmoshchnyh dugovyh staleplavil'nyh pechey* [Optimization of the electrical regimes for ultra-high power electric furnace]. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2014, no.5, pp. 15-22.

Информация о других журналах издательства

«**Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова**» – научный рецензируемый журнал, в котором публикуются результаты прогрессивных научных и проектных работ известных ученых, промышленников, молодых ученых России и зарубежья по широкому спектру исследований в области металлургии, машиностроения, металлообработки и в смежных отраслях. Тематика публикаций охватывает весь комплекс актуальных вопросов от разработки полезных ископаемых, получения чугуна, стали и проката до производства продукции с глубокой степенью переработки для различных отраслей экономики. Большое внимание в журнале уделяется современным тенденциям развития сырьевой базы, энергосбережения, автоматизации, экономики и экологии, стандартизации и управления качеством продукции, подготовки и обучения кадров в области металлургии, машиностроения и металлообработки.

Издается с 2003 г.

Журнал с 2007 года включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а также в Базы данных ВИНИТИ и РИНЦ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

В редакционный совет журнала входят авторитетные ученые из России, Японии, Индии, Италии, Польши, Южно-Африканской Республики, Казахстана.

Электронная версия журнала доступна:

• на информационном портале ФГБОУ ВПО «МГТУ» www.magtu.ru (раздел «Журнал Вестник МГТУ»);

• на сайте журнала www.vestnik.magtu.ru;

• на платформе eLIBRARY.