

DOI 10.15589/jnn20150312
УДК 621.438
К59

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PLASMA STABILIZER CHARACTERISTICS FOR LOW-EMISSION COMBUSTION CHAMBER OF A GAS TURBINE ENGINE

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО СТАБИЛИЗАТОРА ДЛЯ НИЗКОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Artem V. Kozlovskii
artem.kozlovskiy@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6204-7782

Yevhen Yu. Kirchuk
evgeniy.kirchuk@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6353-5799

А. В. Козловский
асп.

Е. Ю. Кирчук
соискатель

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The stabilization of thermo-acoustic processes in low-emission combustion chambers of gas turbine engines using plasma stabilizers has been discussed. The article aim is an experimental study of energy characteristics of the low-temperature plasma generator power supply designed to stabilize the combustion processes of gaseous fuels in the low-emission combustion chamber of a gas turbine engine. The experimental study of the low-temperature plasma generator characteristics with purpose of its use as a flame stabilizer in the low-emission combustion chamber of the gas turbine engine operating on gaseous fuels. The conducted tests of the plasma generator and the analysis of the obtained data allowed determining a range of stable operation of the plasma generator designed to stabilize the thermo-acoustic processes in the low-emission combustion chambers of gas turbine engines.

Keywords: gas turbine engine; combustion chamber; pulsating combustion; combustion stabilization; plasma generator.

Анотація. Стаття присвячена питанню стабілізації термо-акустичних процесів в низькоемісійних камерах згорання газотурбінних двигунів (ГТД) з використанням плазмових стабілізаторів. Проведено експериментальні дослідження характеристик генераторів низькотемпературної плазми з метою їх застосування як стабілізаторів полум'я в малоемісійній камері згорання ГТД, що працює на газоподібному паливі. Визначено діапазон стійкої роботи джерела живлення плазмотрона, призначеного для стабілізації термо-акустичних процесів в камерах згорання ГТД.

Ключові слова: газотурбінний двигун; камера згорання; пульсаційне горіння; стабілізація горіння; плазмовий генератор.

Аннотация. Статья посвящена вопросу стабилизации термо-акустических процессов в низкоэмиссионных камерах сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) с использованием плазменных стабилизаторов. Проведены экспериментальные исследования характеристик генератора низкотемпературной плазмы с целью его применения в качестве стабилизатора пламени в камере сгорания ГТД, работающей на газообразном топливе. Определен диапазон устойчивой работы источника питания плазмотрона, предназначенного для стабилизации горения в камерах сгорания ГТД.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; камера сгорания; пульсационное горение; стабилизация горения; плазменный генератор.

REFERENCES

- [1] Gorelov V. I. *Ekspluatatsiya korabelnykh gazoturbinnnykh ustanovok* [Operation of ship gas turbine plants]. Moscow, Voenizdat Publ., 1972. 312 p.
- [2] Isakaev E. H., Sinkevich O. A. *Shuntirovanie toka i vyzivanniye im izmeneniya napryazheniya v kanale plazmotronov s samoustanavlivayuscheysya dlinoy elektricheskoy dugi* [Current shunting and induced voltage changes in the channel of plasma torches with the self-adjusting arc length]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2003, vol. 41, no. 3, pp. 334–341.

- [3] Serbin S. I., Vilkul V. V., Vantsovskiy V. G., Kulishov S. B., Berezhnoy V. Yu. *Issledovanie vibratsionnykh kharakteristik sudovogo gazoturbinnogo dvigatelya s gibridnoy kameroy sgoraniya* [Study of the vibration characteristics of marine gas turbine engine with hybrid combustion chamber]. *Vestnik NUK — NUS Journal. Electronic Edition*, 2004, no. 1, pp. 56–62.
- [4] Serbin S. I., Mostipanenکو A. B., Kozlovskiy A. V., Vilkul V. V. *Metody snizheniya intensivnosti pulsatsionnogo goreniiya v kamere sgoraniya GTD, rabotayushchey na gazoobraznom toplive* [Methods of reducing the intensity of the pulsating combustion in the combustion chamber of the gas turbine engine operating on gaseous fuels]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace Engineering and Technology*, 2014, vol. 8, issue 115, pp. 84–88.
- [5] Romanovskiy G. F., Serbin S. I. *Plazmokhimicheskie sistemy sudovoy energetiki* [Plasma-chemical systems of marine energetics]. Nikolaev, UGMTU Publ., 1998. 246 p.
- [6] Romanovskiy G. F., Vashchilenko M. V., Serbin S. I. *Teoretychni osnovy proektuvannia sudnovykh hazoturbinykh ahrehativ* [Theoretical foundations of marine gas turbine plants design]. Mykolaiv, UDMTU Publ., 2003. 304 p.
- [7] Serbin S. I., Kozlovskiy A. V., Vilkul S. V. *Issledovanie energeticheskikh kharakteristik plazmennogo generatora dlya stabilizatsii termo-akusticheskikh protsessov v kamerakh sgoraniya* [Study of the plasma generator energy characteristics for stabilization of thermal-acoustic processes in combustion chambers]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia — The Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Series: «Power and heat engineering processes and equipment»*, 2015, no. 17, issue 1126, pp. 44–48.
- [8] Clements R. M., Smy P. R., Dale J. D. *An Experimental Study of the Injection Mechanism for Typical Plasma Jet Igniter. Combustion and Flame*. 1981, vol. 42, pp. 287–295.
- [9] Matveev I. B. *Multi-mode Plasma Igniters and Pilots for Aerospace and Industrial Applications*. 2-nd Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion, Falls Church. Virginia, 2006, vol. 12, p. 5.
- [10] Romanovsky G. F., Serbin S. I. *Plasma-chemical systems for ecologically clean marine gas turbines. Explo-Diesel & Gas Turbine '01*, Poland, 2001, vol. 1, pp. 267–272.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время имеется значительный опыт эксплуатации энергетических установок судов и кораблей, оснащенных газотурбинными двигателями [5]. Хорошие массогабаритные показатели, высокая маневренность, простота управления и обслуживания, достаточная экономичность и надежность дают возможность газотурбинным установкам в ряде случаев выгодно конкурировать с паротурбинными и дизельными энергетическими установками [1].

Достигнуты значительные успехи в конструировании и доводке камер сгорания (КС) газотурбинных двигателей (ГТД), которые являются наиболее теплонпряженным узлом всего двигателя. Несмотря на это, проблеме пульсационного (неустойчивого) горения в КС, для решения которой требуются существенные материальные затраты, уделено недостаточно внимания в литературе.

Колебания давления и вибрации, вызываемые неустойчивостью горения, в зависимости от механизма их возбуждения и интенсивности могут ограничиться КС или распространиться на другие системы двигателя. Однако и в том, и в другом случае вибрационное горение недопустимо, поскольку оно сопровождается резким увеличением шума, срывами пламени, разрушением камеры, выходом из строя и поломкой элементов конструкции КС, а также отдельных узлов и агрегатов ГТУ [3, 4].

Одним из перспективных методов управления неустойчивым режимом горения топливно-воздушных смесей в КС ГТД есть применение плазменных струй, которые подаются в КС в противофазе к существующим колебаниям давления [4].

Системы плазмохимической интенсификации сжигания топлив в ГТД [5, 8] включают в себя генераторы низкотемпературной плазмы, источники их питания, устройства для подвода плазмообразующего газа, топлива, регулирования и контроля параметров и режимов работы. Плазменные элементы представляют одни из главных элементов системы: плазмохимические реакторы, плазменно-топливные форсунки, плазмохимические реакторы водородсодержащего газа и плазменные воспламенители, которые подключены к источнику питания со специальной внешней характеристикой. Использование плазмотронов в качестве генератора активных частиц, повышающих устойчивость горения топлив в КС ГТД, ставит определенные требования к массогабаритным, мощностным, эксплуатационным и другим характеристикам. Условия их работы в камерах сгорания ГТД — высокие температуры, давления, возможные нагарообразования, вибрации и др. — требуют создания конструкций плазменных генераторов и источников их электропитания, обладающих при минимальных габаритах и мощности высокой надежностью, долговечностью и отличающихся при этом устойчивостью рабочих характеристик.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Теоретические и экспериментальные исследования плазменного метода сжигания углеводородных топлив позволили разработать и создать высокоэффективные системы плазмохимической интенсификации, а также ряд плазмохимических устройств для инициирования воспламенения и стабилизации горения топлив в КС ГТД [10].

Изучение природы и свойств электрической дуги [9], генерируемой высоковольтными источниками питания, показало теоретическую возможность использования неравновесной плазмы для стабилизации пламени в КС ГТД.

В работе [7] проведены экспериментальные исследования плазмотрона постоянного тока, предназначенного для подавления пульсаций и увеличения стабильности работы низкоэмиссионной камеры сгорания ГТД. Получена вольт-амперная характеристика плазменного генератора для различных расходов плазмообразующего воздуха. Во всем диапазоне режимных параметров эта характеристика имеет крутопадающий характер (рис. 1)

Определен диапазон устойчивой работы плазмотрона постоянного тока, используемого для стабилизации термо-акустических процессов в камерах сгорания. Зона устойчивого горения дуги плазмотрона обеспечивается регулированием силы тока от 0,3 до 0,9 А при расходах плазмообразующего воздуха до 3,39 г/с. При этом для осуществления процесса первоначального пробоя зазора и запуска плазмотрона напряжение на электродах увеличивалось до 1,5–2,5 кВ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — экспериментальное исследование энергетических характеристик источника питания и генератора низкотемпературной плазмы,

предназначенного для стабилизации процессов горения газообразных топлив в малоэмиссионной камере сгорания ГТД.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Применение плазмотрона в качестве стабилизатора термо-акустических процессов в камере сгорания ГТД позволит расширить диапазон устойчивой работы камеры, что приведет к уменьшению пульсаций топливо-воздушной смеси и, следовательно, вибрации элементов камеры сгорания и двигателя в целом.

Основными задачами экспериментальных исследований плазменных стабилизаторов являются:

- определение расходных и вольт-амперных характеристик плазменного генератора при работе на плазмообразующем воздухе;
- выявление расходных и вольт-амперных характеристик плазменного генератора при работе на смеси плазмообразующего воздуха и природного газа;
- оценка возможностей использования неравновесной плазмы для воспламенения и стабилизации горения топлива в камере сгорания ГТД.

Плазменный стабилизатор представляет собой устройство генерирования низкотемпературной плазмы, которое в качестве плазмообразующей среды использует либо воздух, либо смесь воздуха с природным газом.

Для анализа характеристик электрической дуги, определения зависимости пробивного напряжения от рабочего давления в канале плазменного генератора, оптимизации размеров зазоров между катодом и анодом плазмотрона разработан испытательный стенд (рис. 2). Стенд состоит из плазменного генератора 4, установленного в специальном отсеке 2 высокого давления (до 3,0 МПа) с внутренним диаметром 50 мм и длиной 300 мм, высоковольтного пробника 5

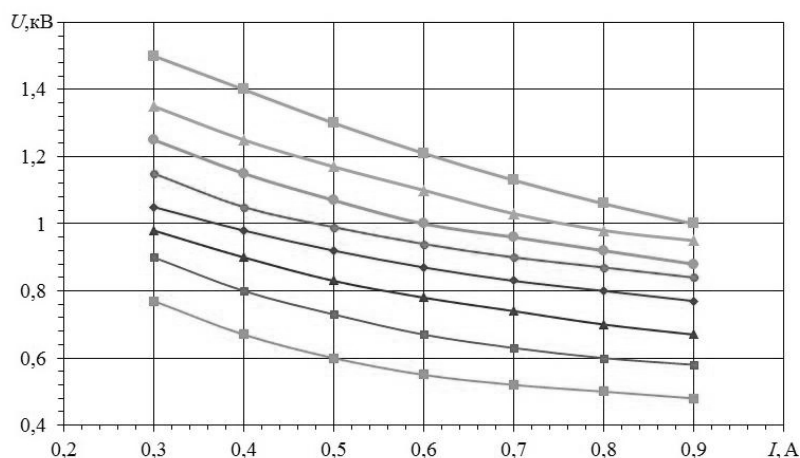


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика плазмотрона при различных расходах плазмообразующего воздуха:

—■— $Q = 0,422$ г/с; —●— $Q = 1,68$ г/с; —■— $Q = 0,663$ г/с; —●— $Q = 2,14$ г/с; —▲— $Q = 0,946$ г/с; —▲— $Q = 2,75$ г/с; —◆— $Q = 1,28$ г/с; —■— $Q = 3,39$ г/с

с входным напряжением от 15 до 40 кВ, источника питания 1, высокочастотного осциллографа TDX1012 7 с модулем связи, компрессора 6, манометра 3. Для исследования влияния состава топливоздушнй смеси на характеристики электрической дуги предусмотрен подвод топлива (как жидкого, так и газообразного) в канал плазменного генератора. С помощью запорной арматуры поддерживался постоянный массовый расход плазмообразующего газа. В данной работе приведены характеристики электрической дуги плазменного генератора при расходе плазмообразующего воздуха 0,66 г/с.

В результате экспериментальных исследований получены осциллограммы напряжений на дуге в момент включения источника питания (напряжение пробоя), во время устойчивой работы плазменного генератора и при выключении источника питания для различных уровней потребляемых мощностей (рис. 3, рис. 4).

Напряжение пробоя электродугового промежутка при работе плазменного генератора в атмосферных условиях превышает 5 кВ. Рабочее напряжение на дуге при устойчивой работе плазмотрона для исследуемой их геометрии в интервале потребляемой мощности 226–282 Вт составило 1,51–1,02 кВ. На рис. 3 и 4 осциллограммы напряжения на дуге при устойчивом горении дуги (режим б) приведены для частот импульсов 7,41 и 20,79 кГц. Пульсации напряжения на дуге для потребляемой мощности 226 Вт равны — (+ 888 В; –624 В), а для мощности 282 Вт — (+ 560 В; –460 В), что составляет в среднем от 59 до 41 % от среднего напряжения на дуге. Эти данные доказывают крайне нестационарный характер шунтирования электрической низкоточной дуги. Для уменьшения флуктуаций напряжения на дуге плазменных генераторов с самоустанавливающейся длиной электрической дуги целесообразно использовать механизм перезамыкания анодного участка дуги — шунтирования электрической дуги [2].

Проведены ресурсные испытания плазменного генератора, позволившие установить значительное увеличение продолжительности работы электродов (более 3000 часов) по сравнению с ранее использовавшимися для интенсификации процессов горения топлив плазмотронами постоянного тока [5].

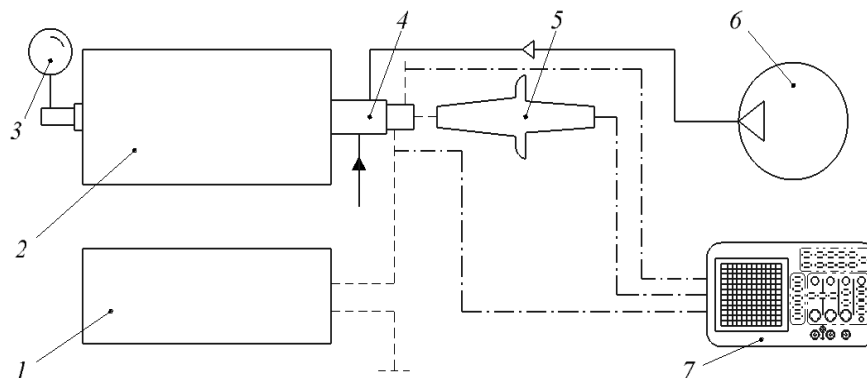


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки для испытания плазменного генератора:

1 — источник питания; 2 — экспериментальный отсек; 3 — манометр; 4 — плазменный генератор; 5 — высоковольтный пробник; 6 — компрессор; 7 — осциллограф TDS 1012

— — — электропитание; - · - · - · — контроль параметров; ▲ — топливо; Δ — воздух

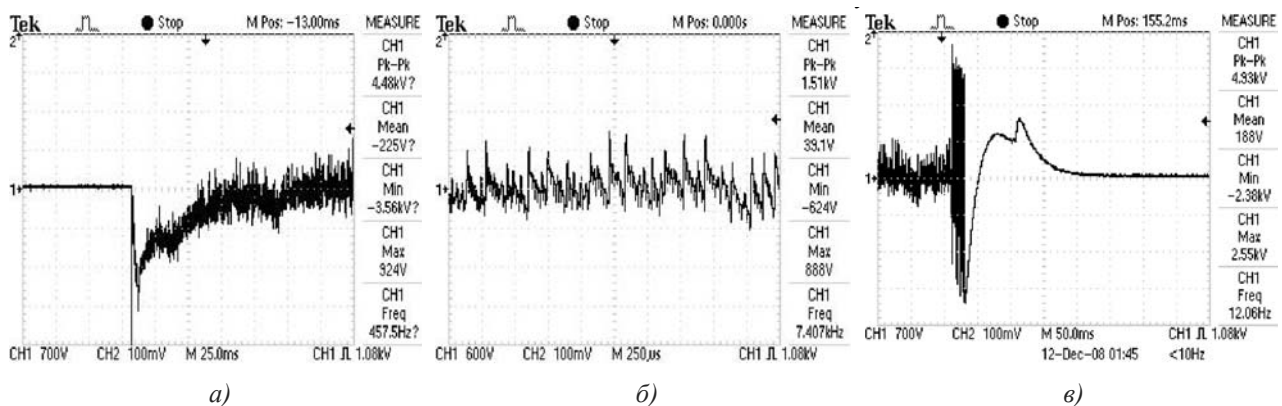


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на дуге (мощность плазмотрона 226 Вт):

а — включение источника питания; б — работа плазменного генератора; в — выключение источника питания

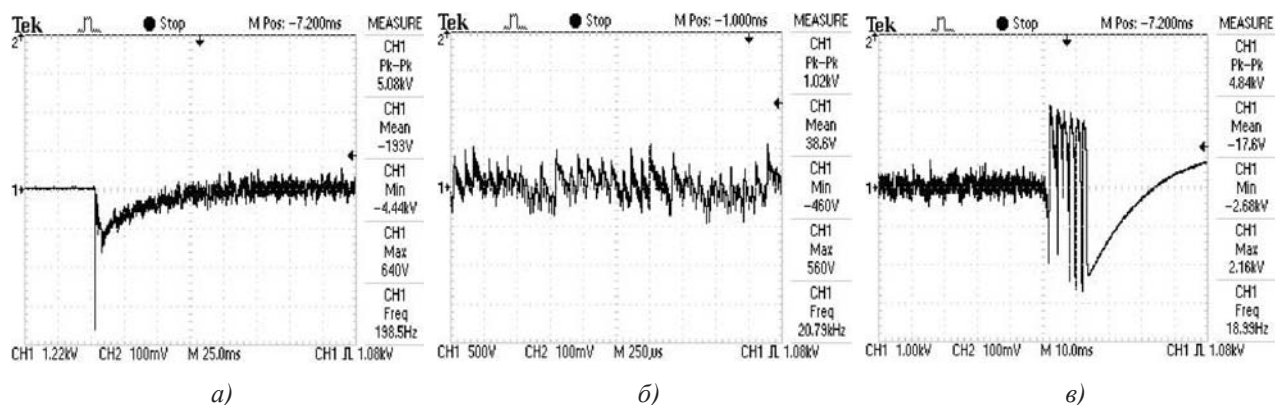


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на дуге (мощность плазмотрона 282 Вт):

a — включение источника питания; *б* — работа плазменного генератора; *в* — выключение источника питания

ВЫВОДЫ. Проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик источника питания и генератора низкотемпературной плазмы, предназначенного для стабилизации пламени в малоэмиссионной камере сгорания ГТД, работающей на газообразном топливе. Доказана эффективность низ-

коточных генераторов низкотемпературной плазмы с низким энергопотреблением (150–300 Вт). Подтверждена их работоспособность при высоких давлениях рабочего тела (до 3,0 МПа), характерных для номинальных режимов работы газотурбинных двигателей, а также высокий ресурс электродов (более 3000 часов).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горелов, В. И. Эксплуатация корабельных газотурбинных установок [Текст] / В. И. Горелов. — М. : Воениздат, 1972. — 312 с.
- [2] Исакаев, Э. Х. Шунтирование тока и вызванные им изменения напряжения в канале плазмотронов с самоуставляющейся длиной электрической дуги [Текст] / Э. Х. Исакаев, О. А. Синкевич // Теплофизика высоких температур. — 2003. — т. 41. — № 3. — С. 334–341.
- [3] Исследование вибрационных характеристик судового газотурбинного двигателя с гибридной камерой сгорания [Текст] / С. И. Сербин, В. В. Вилкул, В. Г. Ванцовский, С. Б. Кулишов, В. Ю. Бережной // Вестник НУК имени адмирала Макарова. — Николаев : НУК, 2004. — № 1. — С. 56–62.
- [4] Методы снижения интенсивности пульсационного горения в камере сгорания ГТД, работающей на газообразном топливе [Текст] / С. И. Сербин, А. Б. Мостипаненко, А. В. Козловский, В. В. Вилкул // Авиационно-космическая техника и технология : научно-технический журнал. — Харьков : «ХАИ», 2014. — № 8 (115). — С. 84–88.
- [5] Романовский, Г. Ф. Плазмохимические системы судовой энергетики [Текст] / Г. Ф. Романовский, С. И. Сербин. — Николаев : УГМТУ, 1998. — 246 с.
- [6] Романовський, Г. Ф. Теоретичні основи проектування суднових газотурбінних агрегатів [Текст] : Навчальний посібник / Г. Ф. Романовський, М. В. Ващенко, С. І. Сербін. — Миколаїв : УДМТУ, 2003. — 304 с.
- [7] Сербин, С. И. Исследование энергетических характеристик плазменного генератора для стабилизации термоакустических процессов в камерах сгорания [Текст] / С. И. Сербин, А. В. Козловский, С. В. Вилкул // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. — Харків : НТУ «ХП», 2015. — № 17 (1126). — С. 44–48.
- [8] Clements, R. M. An Experimental Study of the Injection Mechanism for Typical Plasma Jet Igniter [Text] / R. V. Clements, P. R. Smy, J. D. Dale // Combustion and Flame. — 1981. — Vol. 42. — P. 287–295.
- [9] Matveev, I. B. Multi-mode Plasma Igniters and Pilots for Aerospace and Industrial Applications [Text] / I. B. Matveev // 2-nd Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion, Falls Church. — Virginia, 2006. — Vol. 12. — p. 5.
- [10] Romanovsky, G. F. Plasma-chemical systems for ecologically clean marine gas turbines [Text] / G. F. Romanovsky, S. I. Serbin // Explo-Diesel & Gas Turbine '01. — Poland, 2001. — Vol. 1. — P. 267–272.

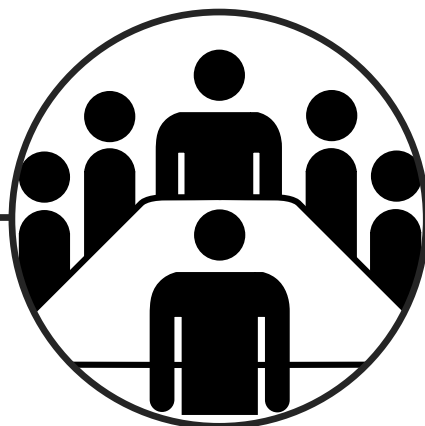
© А. В. Козловський, С. Ю. Кирчук

Надійшла до редколегії 19.05.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. С. І. Сербін

УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ

Антипова Є. О.
Григорян Т. Г.
Коваленко І. І.
Пугаченко Є. С.
Чимшир В. І.



Збірник
наукових праць
2015