

А. Г. БУРЯЧЕНКО, Г. С. РАНЧЕНКО, А. О. ТАРАНИШИН

АО «Элемент», Одесса, Украина

РЕГУЛЯТОР ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ МС-500 – РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ

Показаны особенности процесса разработки регулятора двигателя цифрового РДЦ-450М-С-500 для турбовинтового двигателя МС-500В-02С как очередной модификации в ряду семейства регуляторов вертолетных и самолетных (включая беспилотные летательные аппараты) двигателей, разработанных и серийно выпускаемых АО «Элемент» с 2014 года, когда на типовую конструкцию РДЦ-450М было получено Свидетельство о годности комплектующего изделия авиационной техники. Описано создание нового регулятора как модификация базовой конструкции с одновременной доработкой специально разработанного универсального стенда-имитатора авиадвигателя, обеспечивающего настройку и проверку параметров регулятора. Приведены сведения об отличиях требований к контролю роторных вибраций относительно предшествующих модификаций регулятора. Показано, что в процессе разработки выявилась необходимость существенной корректировки математической модели двигателя, первоначально предоставленной разработчиком двигателя АО «Мотор Сич» и отражены результаты выполненной специалистами АО «Элемент» корректировки статической и динамической составляющих модели, основанной на экспериментальных данных. Приведены результаты использования новой математической модели двигателя, включая математическую модель насоса-дозатора. Показано, что интеграция новой математической модели в универсальный стенд-имитатор обеспечила настройку регулятора РДЦ-450М-С-500 и его последующие успешные испытания в составе двигателя, в том числе, обеспечение поддержания заданного ускорения ротора турбокомпрессора, что подтвердило адекватность модели. Даны сведения о квалификации регулятора в Авиационном регистре Межгосударственного авиационного комитета, по результатам которой получено Дополнения к Свидетельству о годности комплектующего изделия, и о подготовке к сертификации в составе двигателя МС-500В-02С в Госавиаслужбе Украины. Упомянуто, что опыт специалистов АО «Элемент» вынуждает их отметить необходимость усилить методическую поддержку разработчиков комплектующих изделий авиационной техники со стороны Госавиаслужбы.

Ключевые слова: комплектующее изделие авиационной техники; квалификационные испытания; главное изменение типовой конструкции.

Введение

В АО «Элемент» разработаны и серийно выпускаются регуляторы для авиадвигателей разработки ГП «Ивченко–Прогресс» и АО «Мотор Сич», такие как:

– РДЦ-450М – для двигателя АИ-450 вертолетов Ми-2М и Ми-2МСБ, выпускается серийно с 2014 года [1];

– РДЦ-450М-В – для двигателя АИ-450В вертолетов Ми-2МСБ-В, выпускается серийно с 2018 года;

– РДЦ-450М-С – для двигателя АИ-450С самолетов DART-450, выпускается серийно с 2018 года;

– РДЦ-450М-С-Т-Р – для двигателя беспилотного летательного аппарата, серийный выпуск начат в 2020 году.

Наряду с производством серийной продукции в АО «Элемент» идет процесс постоянной модернизации ранее разработанных моделей и разработка

новых регуляторов, что обусловлено как требованиями заказчиков в связи с модернизацией существующих и разработкой новых авиадвигателей, так и совершенствованием технологии изготовления регуляторов, обновлением стремительно развивающейся элементной базы [2].

Сокращению сроков разработки и испытаний новых модификаций регуляторов в значительной мере способствует использование созданной на предприятии базовой унифицированной конструкции, что соответствует одной из определяющих тенденций в опытно-конструкторских работах ведущих предприятий-разработчиков комплектующих изделий авиационной техники [3, 4].

Одновременно с базовой конструкцией регулятора на предприятии разрабатывались специализированные стенды [5 – 7], среди которых – стенд-имитатор авиадвигателя, обеспечивающий полноценную настройку и проверку регуляторов, как в процессе разработки, так при выпуске из производ-

ства. Этот стенд-имитатор, описанный в [7], на сегодняшний день можно назвать универсальным в том смысле, что для обеспечения имитации нового типа авиадвигателя достаточно интегрировать в состав стенда его математическую модель.

Очередной модификацией в ряду разработанных АО «Элемент» регуляторов типа РДЦ-450М явился находящийся в настоящее время в стадии подготовки производства регулятор для авиадвигателя МС-500В-02С АО «Мотор Сич» – РДЦ-450М-С-500.

1. Постановка задачи

Анализ требований технического задания на разработку регулятора РДЦ-450М-С-500 выявил, что, место расположения регулятора на объекте и, соответственно, требования к составу и уровням внешних воздействующих факторов не имеют значительных отличий от требований, применявшихся к ранее разработанной базовой конструкции, а это позволяет использовать имеющиеся конструктивно-технологические решения, вплоть до идентичного корпуса и конструкции модулей.

Кроме того, учитывая требования к выполняемому регулятором функциям, ранее примененная элементная база и схемотехнические решения также могли быть использованы в значительной мере для создания новой модификации.

Таким образом, анализ выявил, что основными задачами в рамках создания регулятора РДЦ-450М-С-500 являются:

- разработка встроенного программного обеспечения, реализующего алгоритмы управления двигателем в соответствии с математической моделью МС-500В-02С и одновременно доработка универсального стенда-имитатора с целью обеспечения настройки и проверки регулятора;

- выполнение существенно более высоких требований к поддержанию скорости «разгона», т.е. набора оборотов ротора турбокомпрессора при изменении расхода топлива;

- существенное расширение диапазона преобразований виброускорения (с дополнительным пересчетом в виброскорость с учетом частоты вибрации) при сохранении требований к пределам погрешностей преобразования;

- интеграция в состав модуля контроля роторных вибраций встроенного регистратора результатов виброизмерений с хранением информации за период не менее 8 ч.

Кроме того, среди отличий от предыдущих модификаций регуляторов можно отметить, что имело место некоторое изменение количества измерительных каналов, входных и выходных дискретных и

цифровых сигналов, например, необходимо было организовать три канала обработки сигнала от термостружкосигнализатора вместо ранее имевшихся двух.

2. Результаты

К настоящему времени разработан и прошел необходимые испытания регулятор для двигателя МС-500В-02С – РДЦ-450М-С-500, квалифицированный в качестве модификации типовой конструкции базовой модели РДЦ-450М, о чем получено Дополнение к Свидетельству о годности.

Конструкция корпуса, внутренняя компоновка модулей и технология изготовления нового регулятора практически идентичны базовой модели, показанной на рисунке 1.

Модульная конструкция, как и планировалось, в значительной степени облегчила введение изменений, связанных с изменением состава функций регулятора и их характеристик.



Рис. 1. Базовая модель регулятора, разработанная в АО «Элемент»

В части схемотехнических решений наибольшие изменения претерпел модуль контроля роторных вибраций.

Дело даже не в том, что в качестве измеряемой величины вместо виброускорения (как в РДЦ-450М) в техническом задании была указана виброскорость, а в том, что, несмотря на кажущееся сохранение диапазона измерений по каналам с цифровым выходом (30 g для РДЦ-450М и 100 мм/с при частоте до 800 Гц для РДЦ-450М-С-500), верхний предел преобразования каналов широкополосной фильтрации был задан на уровне 500 g. Учитывая, что первое звено – усилитель заряда – для обоих типов каналов неизбежно должно быть общим, такое требование фактически означало значительное расширение диапазона измерений, в то время, как требова-

ния по пределам погрешностей измерений остались неизменными.

Кроме того, к модулю контроля роторных вибраций было предъявлено требование по обеспечению записи и хранения результатов контроля вибрации за период не менее 8 ч, чего ни в базовой модели, ни в ее модификациях, разработанных ранее, не предусматривалось.

Эти изменения потребовали от разработчиков АО «Элемент» весьма существенной доработки модуля контроля роторных вибраций.

Что касается изменения (по сравнению с базовой моделью) количества измерительных каналов, входных и выходных дискретных и цифровых сигналов, то этот вопрос относительно просто решался за счет заранее предусмотренного в базовой модели соответствующего резерва, что, как отмечено в [4], при правильном выборе современных электронных компонентов, имеющих высокую степень интеграции, вполне достижимо без увеличения массогабаритных характеристик регулятора и без снижения показателей надежности.

В этой связи следует отметить, что при разработке базовой модели с целью повышения надежности модульной конструкции, предполагающей значительное количество межплатных соединений, для их обеспечения внедрена технология гибко-жестких печатных плат [4].

Доработка базовых версий встроенного программного обеспечения регулятора и программного обеспечения стенда-имитатора под двигатель МС-500В-02С потребовала больше времени, чем ожидалось по предыдущему опыту введения новых модификаций.

Дело в том, что полученная от АО «Мотор Сич» математическая модель описывала собственно не двигатель МС-500В-02С, а его прототип и, как выяснилось, имела существенные отличия от реальных характеристик МС-500В-02С. По этой причине на первом этапе результаты взаимодействия регулятора РДЦ-450М-С-500 со стендом, имитирующим двигатель в соответствии с предоставленной моделью, и результаты взаимодействия непосредственно с двигателем отличались радикально.

Так, например, при первых испытаниях с реальным двигателем на режиме приемистости было зарегистрировано предпомпажное состояние, регулирование ускорения турбокомпрессора вызвало автоколебательный процесс.

Эта ситуация потребовала от специалистов АО «Элемент» дополнительного изучения данных по испытаниям двигателя МС-500В-02С на стендах АО «Мотор Сич» и соответствующей корректировки математической модели двигателя (как статиче-

ской, так и динамической составляющих), включая и модель насоса-дозатора.

Для иллюстрации можно отметить, что функция зависимости скорости вращения турбокомпрессора от расхода топлива $N_{тк} = f(G_t)$ в старой модели при выполнении вычислений давала отличие от экспериментальных данных от плюс 4 до плюс 12 % (в зависимости от текущего значения – рисунок 2), а новая обеспечила плюс 0,4 – минус 3,6 %, что свидетельствует о выходе на уровень погрешности аппроксимации, обусловленной, прежде всего, объективно существующими погрешностями измерений при испытаниях.

Аналогичные результаты были получены и для других характеристик режимов работы двигателя.

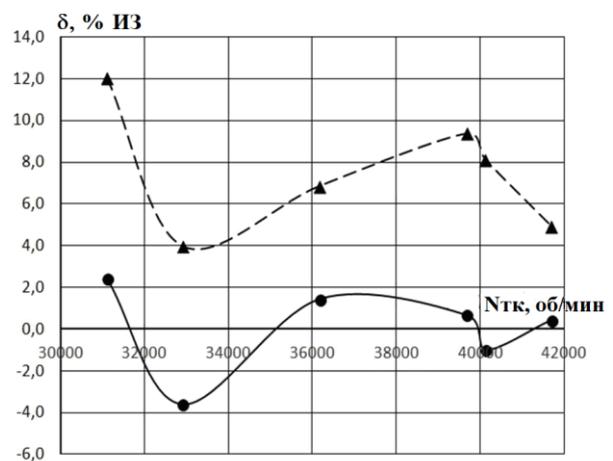


Рис. 2. Отклонения скорости вращения турбокомпрессора по «старой» (штриховая линия) и новой математическим моделям от измеренной

Необходимая коррекция была выполнена и адекватность новой модели, интегрированной в стенд-имитатор, подтверждена результатами последующих испытаний двигателя совместно с регулятором РДЦ-450М-С-500.

Были также уточнены требования к функционированию регулятора РДЦ-450М-С-500, в том числе, к обеспечению необходимой скорости набора оборотов ротора турбокомпрессора (поддержания заданного значения ускорения турбокомпрессора).

После формирования новой математической модели и, в том числе, определения количественных характеристик зависимости ускорения турбокомпрессора от расхода топлива (причем, было выяснено, что эти характеристики различаются для разных режимов работы двигателя) выполнена настройка соответствующего ПИД-регулятора, входящего в состав РДЦ-450М-С-500.

Проведенная работа обеспечила создание регулятора РДЦ-450М-С-500, успешно прошедшего все

необходимые испытания на площадке АО «Элемент» и на двигательных стендах АО «Мотор Сич», а также соответствующую квалификацию в Авиационном регистре Межгосударственного авиационного комитета на получение Дополнения к Свидетельству о годности комплектующего изделия в качестве новой модификации типовой конструкции регулятора двигателя цифрового РДЦ-450М.

В настоящее время начата подготовка к сертификации в Госавиаслужбе Украины двигателя МС-500В-02С и согласно новым, гармонизированным с европейскими, Авиационными правилами Украины АПУ-21 (Part-21) регулятор РДЦ-450М-С должен пройти сертификацию в составе двигателя. Тут, к сожалению, авторы, как представители предприятия-разработчика и изготовителя комплектующих изделий авиационной техники, вынуждены отметить, что ощущают определенный недостаток методического обеспечения и руководства со стороны реформированной Госавиаслужбы.

В частности, это касается нормативной литературы. Например, в АПУ-21 (Part-21), утвержденных приказом №529 от 26 апреля 2019 года дана ссылка на UA TSO как на Технический стандарт Украины (Ukrainian Technical Standard Order, определенный как «детальні вимоги льотної придатності, що прийняті компетентним органом як мінімальні стандартні характеристики для забезпечення відповідності вимогам цих Правил визначених комплектувальних виробів»), но таких стандартов нет вообще.

Отсутствуют и адаптированные DO-160G «Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment», и DO-178C «Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification».

Вместо того, чтобы организовать перевод стандартов с английского, их адаптацию и внедрение, Госавиаслужба издала Приказ, которым разработчикам вменяется использование оригиналов англоязычных документов. К тому же, искать возможность приобрести эти документы предприятия должны самостоятельно.

Возможно, непосредственное решение подобных вопросов собственными силами не входит в компетенцию Госавиаслужбы, однако хотелось бы увидеть организационные мероприятия по привлечению к работе над этими задачами соответствующих структур.

Заключение

1. В АО «Элемент» на основе ранее разработанного базового исполнения регулятора РДЦ-450М для семейства турбовальных двигателей АИ-450 создана новая модификация регулятора РДЦ-450М-

С-500 для двигателя МС-500В-02С, прошедшая квалификацию в Авиационном регистре Межгосударственного авиационного комитета, по результатам которой получено Дополнения к Свидетельству о годности комплектующего изделия. Начата подготовка к сертификации в составе двигателя в Госавиаслужбе Украины.

2. В процессе разработки регулятора РДЦ-450М-С-500 специалисты АО «Элемент» по результатам ряда испытаний сформировали адекватную математическую модель двигателя МС-500В-02С, включая насос-дозатор, которая, будучи интегрирована в ранее разработанный универсальный стенд-имитатор авиадвигателей, обеспечила настройку регулятора в соответствии с заданными требованиями к управлению двигателем.

Литература

1. Регулятор двигателя АИ-450М – результаты разработки и квалификации на категорию А [Текст] / Г. С. Ранченко, А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 10 (117). – С. 93–98.

2. Буряченко, А. Г. Модификация типовой конструкции регулятора двигателя АИ-450М – сущность, процедуры и результаты [Текст] / А. Г. Буряченко, Г. С. Ранченко, Д. С. Бурунов // *Вестник двигателестроения*. – 2017. – № 2 – С. 86-89.

3. Ранченко, Г. С. Перспективы развития электронных САУ ГТД [Текст] / Г. С. Ранченко, А. Г. Буряченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 7 (151). – С. 95-100. DOI: 10.32620/akt.2018.7.14.

4. Базовое исполнение регулятора авиадвигателя и его модификации [Текст] / Г. С. Ранченко, А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2020. – № 8 (168). – С. 160-165. DOI: 10.32620/akt.2020.8.21.

5. Буряченко, А. Г. Стенд-имитатор турбовального двигателя АИ-450М для испытаний регулятора двигателя. Метрологическое обеспечение и аттестация стенда [Текст] / А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин // *Вестник двигателестроения*. 2015. – № 2. – С. 95-101.

6. Буряченко, А. Г. Метрологическое обеспечение испытаний электронных регуляторов ГТД – стенд-имитатор двигательных датчиков [Текст] / А. Г. Буряченко, И. К. Лопаченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 7 (151) – С. 101-106. DOI: 10.32620/akt.2018.7.15.

7. Стенд-имитатор авиадвигателя как универсальное средство обеспечения разработки и испытаний регуляторов [Текст] / А. Г. Буряченко, Д. С. Бурунов, В. М. Грудинкин [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2020. – № 7 (167). – С. 83-88. DOI: 10.32620/akt.2020.7.12.

References

1. Ranchenko, G. S., Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., Golubev, N. L., Danilov, V. V. Regulyator dvigatelja – rezul'taty razrabotki i kvalifikacii na kategoriju A [Engine AI-450M regulator – results of development and qualification for category A]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2014, no. 10 (117), pp. 93-98.
2. Ranchenko, G. S., Burjachenko, A. G., Burunov, D. S. Modifikacija tipovoj konstrukcii reguljatora dvigatelja AI-450M – suzhnost, prozedury i rezul'taty [Modification of the engine AI-450M regulator standard model – essence, procedure and results]. *Vestnik dvigatelestroenija – Engine building messenger*, 2017, no. 2, pp. 86-89.
3. Ranchenko, G. S., Burjachenko, A. G. Perspektivy razvitiya elektronnyh SAU GTD. [Prospects of development electronic automatic control systems for gas-turbine engines]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2018, no. 7 (151), pp. 95-100. DOI: 10.32620/akt.2018.7.14.
4. Ranchenko, G. S., Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., Danilov, V. V. Bazovoe ispolnenie reguljatora aviadvigatelja i ego modifikatsii [Basic model of the aircraft engine regulator and its modifications]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aero-*
5. Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., Burunov D. S. *Stend-imitator turbovalnogo dvigatelja. Metrologicheskoe obespechenie i attestacija stenda* [Test bench-imitator of engine AI-450M for engine regulator testing. Metrological security and test bench verification]. *Vestnik dvigatelestroenija – Engine building mes-senger*, 2015, no. 2, pp. 95-101.
6. Burjachenko, A. G., Lopaschenko, I. K. Metrologicheskoe obespechenie ispitaniy electronnyh reguljatorov GTD – stend-imitator dvigatelnyh datchikov [Metrological supply of electronic regulators for GTE – stand-imitator of engine sensors] *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2018, no.7 (151), pp. 101-06. DOI: 10.32620/akt.2018.7.15.
7. Burjachenko, A. G., Burunov, D. S., Grudinkin, V. M., Taranishin, A. O. Stend-imitator aviadvigatelja kak universalnoe sredstvo obespechenija razrabotki i ispitaniy reguljatorov [Stand imitator of the engine as a universal means of ensuring the development and testing of regulators]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 7 (167), pp. 83-88. DOI: 10.32620/akt.2020.7.12.

Надійшла до редакції 15.05.2021, розглянута на редколегії 20.08.2021

РЕГУЛЯТОР ДЛЯ ДВИГУНА МС-500 - РОЗРОБКА, ВИПРОБУВАННЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ

А. Г. Буряченко, Г. С. Ранченко, А. О. Таранішин

Показано особливості процесу розробки регулятора двигуна цифрового РДЦ-450М-С-500 для турбовинтового двигуна МС-500В-02С як чергової модифікації в ряду сімейства регуляторів вертолітних і літакових (включаючи безпілотні літальні апарати) двигунів, що розроблені і серійно випускаються АТ «Елемент» з 2014 року, коли на типову конструкцію РДЦ-450М було отримано Свідоцтво про придатність комплектуючого виробу авіаційної техніки. Описано створення нового регулятора як модифікації базової конструкції з одночасним доопрацюванням спеціально розробленого універсального стенда-імітатора авіадвигуна, що забезпечує настройку і перевірку параметрів регулятора. Наведено відомості про відмінності вимог до контролю роторних вібрацій щодо попередніх модифікацій регулятора. Показано, що в процесі розробки виявилася необхідність суттєвого коригування математичної моделі двигуна, спочатку наданої розробником двигуна АТ «Мотор Січ» і відображені результати виконаної фахівцями АТ «Елемент» коригування статичної та динамічної складових моделі, виконаного за експериментальними даними. Наведено результати використання нової математичної моделі двигуна, включаючи математичну модель насоса-дозатора. Показано, що інтеграція нової математичної моделі в універсальний стенд-імітатор забезпечила настройку регулятора РДЦ-450М-С-500 і його наступні успішні випробування в складі двигуна, в тому числі, забезпечення підтримки заданого прискорення ротора турбокомпресора, що підтвердило адекватність моделі. Дано відомості про кваліфікацію регулятора в Авіаційному реєстрі Міждержавного авіаційного комітету, за результатами якої отримано Доповнення до Свідоцтва про придатність комплектуючого виробу, і про підготовку до сертифікації в складі двигуна МС-500В-02С в Державіаслужбі України. Згадано, що досвід фахівців АТ «Елемент» змушує їх наголосити на необхідності посилити методичну підтримку розробників комплектуючих виробів авіаційної техніки з боку Державіаслужби.

Ключові слова: комплектуючий виріб авіаційної техніки; кваліфікаційні випробування; головна зміна типової конструкції.

REGULATOR FOR ENGINE MC-500 – DEVELOPMENT, TESTING, CERTIFICATION**A. Buryachenko, G. Ranchenko, A. Taranishin**

There are shown the features of the development process of the digital engine regulator RDTs-450M-S-500 for the MS-500V-02S turboprop engine as another modification in the family of regulators for engines of helicopter and aircraft (including unmanned aerial vehicles). These regulators are developed and serially produced by Element JSC since 2014 year, when the Appliance Design Approval of the aviation equipment component was received for RDTs-450M type. The creation of a new regulator is described as a modification of the basic design with the simultaneous refinement of a specially developed aircraft engine universal stand-imitator, which provides adjustment and verification of the parameters of the regulator. Information about the requirements differences for the rotor vibrations control compare the previous regulator modifications is given. It is shown that during the development process the need for a significant engine mathematical model correction was revealed. Element JSC specialists corrected this model originally provided by the engine developer Motor Sich JSC. The results of this correction performed based on experimental data are reflected. The results of using a new engine mathematical model, including the metering pump mathematical model, are presented. It is shown that the integration of a new mathematical model into a universal stand-imitator provided RDTs-450M-S-500 regulator adjustment and subsequent successful tests of RDTs-450M-S-500 as engine part, which confirmed the adequacy of the model. During this test, ensuring of the turbo-charger rotor acceleration given level was confirmed too. There is provided here information on the regulator qualification in the Aviation Register of the Interstate Aviation Committee, based on the results of which Supplement to Appliance Design Approval for the component were received and information on the preparation for certification as part of the MC-500V-02S engine at the State Aviation Administration of Ukraine. It is mentioned that the experience of JSC "Element" specialists forces them to note the need to strengthen the methodological support of the aviation equipment components developers from the State Aviation Service.

Keywords: component product for aviation technology; qualification tests; major change in standard design.

Буряченко Анна Григорьевна – главный метролог АО «Элемент», Одесса, Украина.

Ранченко Геннадий Степанович – канд. техн. наук, главный конструктор АО «Элемент», Одесса, Украина.

Таранишин Андрей Олегович – инженер АО «Элемент», Одесса, Украина.

Anna Buryachenko – Chief Metrologist of JSC “Element”, Odessa, Ukraine,
e-mail: annaodessa55@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4480-6965.

Gennadii Ranchenko – Candidate of Technical Science, Chief Designer of JSC “Element”, Odessa, Ukraine,
e-mail: odessa@element.od.ua, ORCID: 0000-0002-1896-038X.

Andrey Taranishin – engineer of JSC “Element”, Odessa, Ukraine,
e-mail: odessa@element.od.ua, ORCID: 0000-0001-5320-4857.