

**СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОДИСТАНЦІЙНИХ СИСТЕМ  
КЕРУВАННЯ ЛІТАКАМИ**<sup>1</sup>Національний авіаційний університет  
просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680<sup>2</sup>ДП «Антонов»

вул. Туполева, 1, Київ, Україна, 03062

E-mail: <sup>1</sup>s.yutskevych@bigmir.net; <sup>2</sup>yudin.nikolay.m@gmail.com

*Описано особливості роботи електродистанційних систем керування сучасними транспортними літаками цивільної авіації. Порівняно функціонування систем на рівні апаратного та програмного, вираженого через режими керування, забезпечень літаків Airbus A-320, Boeing B-777, Туполев Ту-214, Sukhoi Superjet SSJ-100. Показано можливість переходу від механічної проводки керування до керування через електродистанційну систему керування в резервному каналі.*

**Ключові слова:** електродистанційна система керування; закон керування; режим керування.

**Постановка проблеми**

Першим серійним транспортним літаком, на якому використано електродистанційну систему керування (ЕДСК) у межах сучасного розуміння цього терміна, з застосуванням цифрових технологій керування рульовими поверхнями був літак авіабудівельної компанії Airbus A-320, який здійнявся в небо 22 лютого 1987 р.

Іншою вагомою подією з погляду еволюції ЕДСК на транспортних літаках цивільної авіації стало створення фірмою Boeing, основним конкурентом Airbus, дальньомагістрального літака B-777, на якому запропоновано відмінну від A-320 архітектуру системи керування літаком.

На теренах Радянського Союзу, а потім СНД роботи в цьому напрямі привели до створення пасажирських літаків у конструкторських бюро Туполева: Ту-204, Ту-214, Ту-334; Антонова: Ан-148, Ан-158 та Сухого – Superjet 100.

Таким чином, на нинішньому етапі розвитку ЕДСК у галузі цивільної транспортної авіації простежуються декілька ідеологій побудови системи керування:

- ідеологія фірми Airbus, уперше запропонована на літаку A-320 і згодом розвинена на A-330/340 і A-380;
- ідеологія фірми Boeing, реалізована на літаках B-777 і B-787;
- ідеологія, реалізована на літаках фірми Туполева та Антонова;
- ідеологія фірми Сухого, застосована на літаку Superjet 100, яку виділимо окремо.

Реалізація кожного підходу має як переваги, так і недоліки.

**Аналіз досліджень і публікацій**

Велика увага авіаційної спільноти приділяється саме порівнянню ідеологій побудови ЕДСК, які реалізовано на літаках фірм Airbus та Boeing [5; 6; 7]. Проте надто мала увага звертається цьому питанню у сфері вітчизняних літаків та порівнянню їх із західними літаками. Це зумовлено невеликим парком вітчизняних літаків, хоча останнім часом спостерігається підвищення інтересу до літаків Superjet 100 та Ан-148 як найближчих конкурентів у сегменті регіональних пасажироперевезень на теренах СНД.

**Мета** роботи – проаналізувати особливості побудови архітектури ЕДСК літаків Airbus A-320, Boeing B-777, Туполев Ту-214 та Sukhoi Superjet 100, порівняти особливості роботи ЕДСК цих літаків в основних та резервних режимах.

**Концепція сучасної ЕДСК**

Для сучасної ЕДСК окрім керування літаком характерним є забезпечення додаткових вимог, пов'язаних із забезпеченням [9]:

- необхідних характеристик стійкості та керованості літака;
- максимальної ефективності керованості літака на всіх режимах польоту в експлуатаційному діапазоні;
- попередження виходу літака за межі експлуатаційного діапазону режимів польоту.

Фірма Airbus використовує для своїх літаків такий алгоритм захисту діапазону режимів польоту, який не дозволяє пілотам вийти за його межі.

Перехід від основного до альтернативних законів керування дозволяє виконувати польоти на позамежових режимах [9].

Інший напрям обрала фірма Boeing: на літаку B-777 пілоти мають можливість подолати обмеження, які створює ЕДСК на органах керування, за рахунок прикладання надмірних зусиль [8].

Зведену інформацію про ЕДСК літаків, які розглядаються у цій роботі, наведено у таблиці.

**Електродистанційна система керування літака Airbus A-320**

Електродистанційну систему керування Airbus A-320 виконано за принципом двократно резервованої цифро-аналогової системи з додатковим, резервним та механічним каналами керування [8].

Основними складовими системи керування є цифрові комп'ютери та органи керування:

1) цифрові комп'ютери:

- два комп'ютери, які відповідають за керування літаком по каналу крену і тангажу (ELAC);
- три комп'ютери, які відповідають за керування спойлерами та елеронами (SEC);
- два комп'ютери для керування рулем напрямку (FAC);
- два комп'ютери для керування передкрилками та закрилками (SFCC);

2) органи керування в кабіні:

- ручки керування (Side stick);
- ручка керування закрилками;
- ручка керування інтерцепторами;

- ручки керування двигунами;
- педалі;
- засоби управління стабілізатором та утримування літака.

Комп'ютери ELAC, SEC і SFCC у сукупності являть собою Flight Control Computer (FCC) – комп'ютер керування польотом.

У системі встановлено два комп'ютери для аналізу інформації про стан польоту та всіх бортових систем, а також для виведення цієї інформації на цифрові дисплеї (FMGS).

Формування командного сигналу в ЕДСК літака показано на рис. 1.

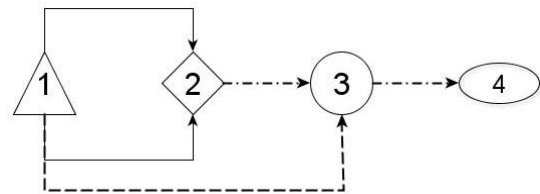


Рис. 1. Принципова схема ЕДСК А-320:

- 1 – органи керування;
- 2 – FCC;
- 3 – PCU;
- 4 – рульова поверхня;
- суцільна лінія – електричний цифровий сигнал;
- штрих-пунктирна лінія – електричний аналоговий сигнал;
- пунктирна лінія – сигнал, який передається механічною проводкою керування

Командний сигнал формується за рахунок зчитування положення органів керування в кабіні пілотів [5; 8].

**Особливості ЕДСК літаків**

Параметри	Airbus A-320	Boeing B-777	Туполев Ту-214	Сухой SSJ-100
Кількість комп'ютерів в ЕДСК	7	7	6	7
Тип обчислювача	Усі цифрові	3 цифрові, 4 аналогові	3 цифрові, 3 аналогові	Усі цифрові
Резервування ЕДСК	Через механічний канал керування за допомогою стабілізатора та руля напрямку	Через механічний канал керування за допомогою стабілізатора та руля напрямку інтерцепторів	Повне механічне резервування всіх каналів	Відсутнє механічне резервування. Резервування за допомогою AFDX
Органи керування в кабіні екіпажу	Стандартний набір органів керування та side stick	Стандартний набір органів керування та штурвал	Стандартний набір органів керування та мініштурвал	Стандартний набір органів керування та side stick
Тип системи збирання і оброблення даних	ARINC 615	ARINC 629	ПУ-56 МН	AFDX
Пропускна здатність	До 1 Мбіт/с	До 10 Мбіт/с	До 128 кбіт/с	До 100 Мбіт/с

Командний сигнал по двох незалежних один від одного каналах «Command channel» і «Monitor channel» через цифрову шину ARINC 615 передається до FCC 2, де вони порівнюються та підлягають аналізу згідно з експлуатаційним діапазонами режимів польоту.

Пріоритетним для передавання керувального сигналу у разі повністю справної системи є канал «Command channel» [8].

Після FCC цифровий сигнал передається через цифрову шину ARINC 615 до цифро-аналогового перетворювача, де він конвертується в аналоговий сигнал і в перетвореному вигляді спрямовується до рульового гідравлічного приводу PCU 3, який, у свою чергу, переміщує рульову поверхню 4 (рис. 1).

Резервний контур керування складається з руля напрямку, який має механічний зв'язок з педалями, і переставного стабілізатора, який також механічно зв'язаний зі своїм органом керування в кабіні пілотів.

Схема з двома каналами використовується для виявлення несправностей через порівняння вихідних даних між собою.

Для керування літаком можна використовувати один з таких законів керування [9]:

– Normal Law. У разі керування в цьому режимі літак повністю дотримується експлуатаційного діапазону режимів польоту і автоматично коригується по трьох осях відповідно до команд FCC.

– Alternate Law. Повністю копіює Normal Law, за винятком автоматичного коригування положення літака.

– Direct Law. Режим керування, за якого виконується пряме передавання керувального сигналу від ручки керування до відповідного керувального гідравлічного приводу. При цьому сигнал минає FCC.

### Електродистанційна система керування літака Boeing B-777

Електродистанційну систему керування Boeing B-777 виконано за принципом трикратно резервованої цифро-аналогової комп'ютерної системи з додатковим, резервним механічним каналом керування (рис. 2).

Система ЕДСК літака містить такі складові:

1) Position Transducers (PT) – датчики положення, які визначають положення органів керування та формують аналоговий електричний сигнал пропорційно відхиленню органів керування;

2) Actuating Computer Electronic (ACE) – блоки керування та контролю рульових приводів (на літаку B-777 встановлено чотири ACE);

3) Primary Flight Computer (PFC) – основний польотний комп'ютер, який відповідає за оброблення та аналіз польотних даних, створення командних сигналів на переміщення керувальних поверхонь та передавання цих даних до ACE через шину передавання даних ARINC 629 (на літаку Boeing 777 є три PFC, кожен з яких складається з трьох незалежних один від одного каналів передавання сигналу: «command lane», «standby lane» та «monitor lane») [4];

4) Power control unit (PCU) – механізм, який перетворює аналоговий електричний сигнал у механічну роботу керування поверхнею керування.

До органів керування в кабіні пілотів належать: штурвал, педалі та ручки керування спойлерами та тримеруванням.

Органи керування 1 у кабіні пілотів механічно поєднані з датчиками положення 2, які формують аналоговий електричний сигнал, пропорційний відхиленню органів керування. Далі командний сигнал прямує до ACE 3 і через цифрову шину обміну даних ARINC 629 потрапляє до трьох PFC 4, де обробляється та аналізується.

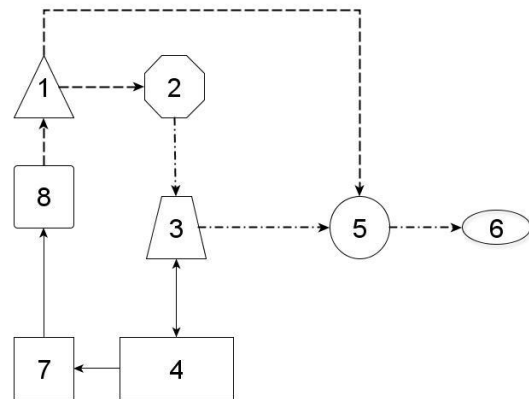


Рис. 2. Принципова схема ЕДСК B-777:

1 – органи керування;

2 – PT;

3 – ACE;

4 – PFC;

5 – PCU;

6 – рульова поверхня;

7 – AFDC;

8 – привід зворотного ходу;

суцільна лінія – електричний цифровий сигнал;

штрих-пунктирна лінія – електричний аналоговий сигнал;

пунктирна лінія – сигнал, який передається механічною проводкою керування

Сигнали з трьох PFC порівнюються один з одним для виявлення різниці, яка може вказувати на несправність, з метою формування остаточного командного сигналу, який повертається до шини ARINC 629 і далі спрямовується до ACE.

На ACE відбувається перетворення цифрового сигналу в аналоговий, який передається на відповідні PCU 5 [8; 9] і керує переміщенням рульової поверхні 6.

У PFC задіяна схожа з Airbus структура, але в ній застосовується не два, а три незалежні канали передавання сигналів: «command lane», «standby lane», «monitor lane». Така структура використовується для підвищення надійності роботи системи та для контролю над її роботою через порівняння даних усіх каналів.

Характерною особливістю ЕДСК літака є наявність у контурі механічної проводки керування приводу зворотного ходу (back drive actuator 8), який під час роботи автопілота переміщує органи керування, що дозволяє пілотам візуально оцінювати роботу автоматичної системи [8]. Ця система стає діючою за допомогою комп'ютера автопілота AFDC (Autopilot Flight Director Computer) 7.

Резервний механічний контур складається з панелей інтерцептора № 4 та 11, які механічно з'єднані з керувальним колесом, та переставного стабілізатора, який також механічно з'єднаний зі своїм органом керування в кабіні пілота.

Літаком можна керувати в одному з трьох режимів керування:

- Normal control. Керування передбачає керування літаком в межах експлуатаційного діапазону режимів польоту і лише в цьому режимі можливе застосування автопілота;

- Secondary control. Керування виконується через пряме передавання керувального аналогового сигналу від сенсорів положення до керувальної поверхні;

- Direct control. Повністю збігається з попереднім режимом, за винятком відсутньої системи гасіння коливань руля висоти (yaw damper) [8].

### Електродистанційна система керування літака Ту-214

Електродистанційну систему керування Ту-214 виконано за принципом трикратно резервованої цифро-аналогової системи, в якій інформаційні датчики та резервний контур – аналогові, а обчислювачі основного контуру – цифрові [2].

Електродистанційна система керування або автоматична система штурвального керування

(АСШК) складається з основного та резервного контурів (рис. 3). У свою чергу, основний контур утворює поздовжній та боковий канали.

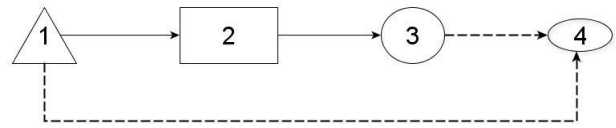


Рис. 3. Принципова схема ЕДСК Ту-214:

1 – органи керування;

2 – АСШК;

3 – рульовий гідравлічний привід;

4 – рульова поверхня;

суцільна лінія – електричний цифровий сигнал;

пунктирна лінія – сигнал, який передається механічною проводкою керування

Резервний контур виконано у вигляді трьох аналогових блоків.

В обчислювачі поздовжнього та бокового каналів через шину передавання даних ПУ-56 МН потрапляють цифрові та аналогові сигнали з різних систем і датчиків літака.

На виході з обчислювачів поздовжнього та бокового каналів основного та резервного каналів виходить аналоговий сигнал керування, який утворюється в результаті переміщення органів керування 1, інформація про стан системи АСШК 2 та інформація для магнітної системи ресстрації параметрів польоту, яка передається через шину передавання даних ПУ-56 МН.

Штурвальне та автоматичне керування літаком по каналу крену, курсу і тангажа за нормальної роботи системи керування рулями (СКР) виконується через основний електродистанційний контур керування СКР.

Під час роботи основного електричного контуру СКР керувальні поверхні відхиляються через команди сигналів з основного цифрового контуру АСШК, які потім надходять у керувальні блоки. Ці блоки, у свою чергу, перетворюють цифровий сигнал в аналоговий і потім спрямовують їх на виконавчі механізми 3, які переміщують рульові поверхні 4.

У разі повної відмови АСШК відбувається автоматичне переведення керування на механічний контур СКР.

Керування рулем висоти та рулем напрямку здійснюється повністю через механічний канал. Керування елеронами в разі відмови ЕДСК неможливе і тому замість них для керування по крену застосовують інтерцептори.

Механічну проводку виконано за допомогою тросів [2].

## Електродистанційна система керування літака SSJ-100

Система керування літака SSJ-100 (рис. 4) являє собою ЕДСК без механічного з'єднання органів керування літаком 1 у кабіні пілотів з поверхнями керування.

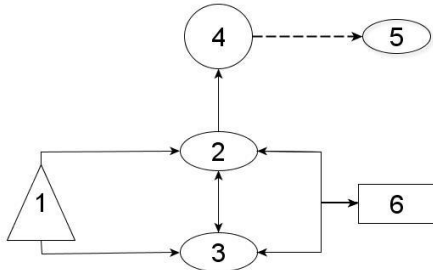


Рис. 4. Принципова схема ЕДСК SSJ-100:

1 – органи керування;

2 – АСЕ;

3 – МАСЕ;

4 – PCU;

5 – рульова поверхня;

6 – PFCU;

суцільна лінія – електричний цифровий сигнал;

пунктирна лінія – сигнал, який передається механічною проводкою керування

Блоки управління і контролю приводів (АСЕ) 2 та контролер-обчислювач електроприводів (МАСЕ) 3 використовуються для передачі командного сигналу між основним польотним комп'ютером PFCU 6 та гідравлічним приводом 4 [1; 3].

Система керування має багатократне резервування та взаємозамінність (cross-fade) усіх своїх компонентів.

Застосування стандарту Avionics Full-Duplex Switched Ethernet (AFDX) [4] є новим кроком в організації передавання та моніторингу даних на борту літака. Принцип роботи цієї системи полягає в тому, що в ній використовується один сервер, який відповідає за приймання, оброблення та передавання даних. Для цього використовується не звичайна мідна проводка, а оптоволоконний кабель з багатоканальною пропускну здатністю, що дозволяє використовувати для зв'язку двадцять чотирьох датчиків лише один кабель і один сервер. При цьому сервер за допомогою шини може бути приєднаний до інших серверів.

У результаті застосування такої технології значно підвищилася швидкість передавання даних як на приймання, так і на передавання даних. Швидкість становить 100 Мбіт/с.

Під час польоту літак може керуватися відповідно до одного з трьох законів керування [2]:

– Normal Law: під час керування літак не виходить за межі експлуатаційного діапазону режимів польоту, а також може автоматично коригуватися по трьох осях відповідно до команд PFCU;

– Alternate Law: ідентичний до Normal Law за винятком автоматичного коригування положення літака;

– Direct Law: у цьому режимі відбувається пряме передавання керувального сигналу від ручки керування до відповідного гідравлічного приводу без використання FCC.

## Висновки

Сучасні тенденції, що супроводжують розвиток ЕДСК на транспортних літаках цивільної авіації, дають змогу відмовитись від механічної проводки керування резервним каналом, а це, у свою чергу, дозволяє зменшити масу планера.

Використання багаторезервованої ЕДСК в аварійній ситуації дозволяє розширити діапазон керування літака і зменшити навантаження на льотний екіпаж.

## Література

1. *Пантелеев О.* Система управління самолётом SSJ (RRJ95) / *О. Пантелеев* // Суперджет (SSJ-100): реальность против домыслов. Устройство самолёта. Система управления самолётом. – Режим доступа: <http://superjet.wikidot.com/wiki:sistema-upravlenia>.
2. *Самолет Ту-214:* руководство по технической эксплуатации. Раздел 27. Система управления. – Москва: ОАО Туполев, 1993. – 740 с.
3. *Самолет RRJ-95B:* руководство по технической эксплуатации. Раздел 27. Система управления. – Москва: ЗАО «ГСС», 2011. – 840 с.
4. *Avionics Full Duplex Switched Ethernet.* AFDX – AFDX Tutorial – AFDX Overview AFDX Training. – Available from Internet: <[http://www.afdx.com/pdf/AFDX\\_Training\\_October\\_2010\\_Full.pdf](http://www.afdx.com/pdf/AFDX_Training_October_2010_Full.pdf)>.
5. Britxe, Dominique. 1993. *AIRBUS A320/A330/A340 Electrical Flight Controls A Family of Fault-Tolerant Systems.* Pascal Traverse. International Symposium on Fault-Tolerant Computing: 616–623.
6. Moir, Ian. 2008. *Aircraft Systems.* Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration. Seabridge Allan. Third Edition. West Sussex, John Wiley & Sons Ltd. 536 p.

7. McWha, James. 1995. *777 – Ready for Service*. RAeS Conference. The Design & Maintenance of Complex Systems on Modern Aircraft: 186–201.

8. Spitzer, Cary R. 2001. *The avionics handbook*. Williamsburg, CRC Press LLC. 768 p.

9. Yeh, Y.C. 1996. *Triple-Triple Redundant 777 Primary Flight Computer*. Aerospace Applications Conference: 293–307.

## References

1. Pantelev, O. *Aircraft flight control SSJ (RRJ95)*. Superjet (SSJ-100). Reality vs. conjecture. Aircraft principle of work. Flight control system. – Available from Internet: <<http://superjet.wikidot.com/wiki:sistema-upravlenia>> (in Russian).

2. *Aircraft Tu-214*. Maintenance Manual. Chapter 27. Flight control. Moscow, OAO Tupolev, 1993. 740 p. (in Russian).

3. *Aircraft RRJ-95B*. Maintenance Manual. Chapter 27. Flight control. Moscow, ZAO “GSS”, 2011. 840 p. (in Russian).

4. *Avionics Full Duplex Switched Ethernet*. AFDX – AFDX Tutorial – AFDX Overview AFDX Training. – Available from Internet: <[http://www.afdx.com/pdf/AFDX\\_Training\\_October\\_2010\\_Full.pdf](http://www.afdx.com/pdf/AFDX_Training_October_2010_Full.pdf)>

5. Britxe, Dominique. 1993. *AIRBUS A320/A330/A340 Electrical Flight Controls A Family of Fault-Tolerant Systems*. Pascal Traverse. International Symposium on Fault-Tolerant Computing: 616–623.

6. Moir, Ian. 2008. *Aircraft Systems*. Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration. Seabridge Allan. Third Edition. West Sussex, John Wiley & Sons Ltd. 536 p.

7. McWha, James. 1995. *777 – Ready for Service*. RAeS Conference. The Design & Maintenance of Complex Systems on Modern Aircraft: 186–201.

8. Spitzer, Cary R. 2001. *The avionics handbook*. Williamsburg, CRC Press LLC. 768 p.

9. Yeh, Y.C. 1996. *Triple-Triple Redundant 777 Primary Flight Computer*. Aerospace Applications Conference: 293–307.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2013.

**Юцкевич Святослав Сергійович**. Кандидат технічних наук. Доцент.

Кафедра конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Освіта: Національний авіаційний університет, Київ, Україна (2005).

Напрям наукової діяльності: втома металів, діагностика втоми авіаційних конструкцій, функціональні системи повітряного судна.

Кількість публікацій: 28.

E-mail: s.yutskevych@bigmir.net,

**Юдін Микола Максимович**. Інженер.

ДП «Антонов», Київ, Україна.

Освіта: Національний авіаційний університет, Київ, Україна (2013).

Напрям наукової діяльності: функціональні системи повітряного судна.

E-mail: yudin.nikolay.m@gmail.com,

## S. Yutskevych<sup>1</sup>, M. Iudin<sup>2</sup>. Modern trends of aircraft fly-by-wire systems

<sup>1</sup>National Aviation University, Kosmonavta Komarova avenue, 1, Kyiv, Ukraine, 03680

<sup>2</sup>ANTONOV Company, Tupoleva street, 1, Kyiv, Ukraine, 03062

E-mails: <sup>1</sup>s.yutskevych@bigmir.net; <sup>2</sup>yudin.nikolay.m@gmail.com

Specifics of civil aviation modern transport aircraft fly-by-wire control systems are described. A comparison of the systems-level hardware and software, expressed through modes of guidance, provision of aircraft Airbus A-320, Boeing B-777, Tupolev Tu-214, Sukhoi Superjet SSJ-100 are carried out. The possibility of transition from mechanical control wiring to control through fly-by-wire system in the backup channel is shown.

**Keywords:** control law; control mode; fly-by-wire control system.

**Yutskevych Sviatoslav**. Candidate of Engineering. Associate Professor.

Aircraft Structure Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Education: National Aviation University, Kyiv, Ukraine (2005).

Research area: fatigue of metals, fatigue diagnostics of aviation structures, aircraft systems.

Publications: 28.

E-mail: s.yutskevych@bigmir.net

**Iudin Mykola.** Engineer.

ANTONOV Company, Kyiv, Ukraine.

Education: National Aviation University, Kyiv, Ukraine (2013).

Research area: aircraft systems.

E-mail: yudin.nikolay.m@gmail.com

**С.С. Юцкевич<sup>1</sup>, Н.М. Юдин<sup>2</sup>. Современные тенденции развития электродистанционных систем управления самолетами**

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет, просп. Космонавта Комарова, 1, Киев, Украина, 03680

<sup>2</sup>ГП «Антонов», ул. Туполева, 1, Киев, Украина, 03062

E-mail: <sup>1</sup>s.yutskevych@bigmir.net; <sup>2</sup>yudin.nikolay.m@gmail.com

Описаны особенности работы электродистанционной систем управления современными транспортными самолетами гражданской авиации. Проведено сравнение функционирования систем на уровне аппаратного и программного, выраженного через режимы управления, обеспечений самолетов Airbus A-320, Boeing B-777, Туполев Ту-214, Sukhoi Superjet SSJ-100. Показана возможность перехода от механической проводки управления к управлению через электродистанционную систему управления в резервном канале.

**Ключевые слова:** закон управления; режим управления; электродистанционная система управления.

**Юцкевич Святослав Сергеевич.** Кандидат технических наук. Доцент.

Кафедра конструкции летательных аппаратов, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Образование: Национальный авиационный университет, Киев, Украина (2005).

Направление научной деятельности: усталость металлов, диагностика усталости авиационных конструкций, функциональные системы воздушных судов.

Количество публикаций: 28.

E-mail: s.yutskevych@bigmir.net

**Юдин Николай Максимович.** Инженер.

ГП «Антонов», Киев, Украина.

Образование: Национальный авиационный университет, Киев, Украина (2013).

Направление научной деятельности: функциональные системы воздушных судов.

E-mail: yudin.nikolay.m@gmail.com