

# ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПОВІТРЯНОГО ТРАНСПОРТУ

УДК 629.735.083.06(045)

DOI: 10.18372/2310-5461.37.12373

**С. С. Ільєнко**, канд. техн. наук, доц.  
Національний авіаційний університет  
orcid.org/0000-0002-0437-0995  
e-mail: ilyenko\_antk@ukr.net

**В. В. Тихонов**, канд. техн. наук, доц.  
Національний авіаційний університет  
orcid.org/0000-0002-1579-5243  
e-mail: tvitenka@rambler.ru

## ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

### Вступ

Період проектування та випробовування авіаційної техніки є досить затратним щодо матеріальних та виробничих ресурсів для будь-якого конструкторського бюро, яке займається випуском нових типів літаків. Тому використання сучасних підходів та вдосконалення методик процесу випробувань направлено на скорочення часового проміжку, який займає саме проектування та випробовування авіаційної техніки зі збереженням відповідної регламентованої якості виконання даних робіт.

### Постановка завдання дослідження

Завданням дослідження є оцінка якості електричної енергії згідно з постійно зростаючими вимогами нормативно-технічних документів (НТД), стандартів та рекомендованої практики ІКАО, а також забезпечення якості електричних параметрів системи електропостачання (СЕП)

повітряного судна (ПС) в умовах перехідних процесів у нормальних, ненормальних та аварійних режимах роботи.

Сертифікація СЕП ПС містила літературу загальносвітового характеру (ISO 1540.3) також ряду країн (ГОСТ Р 54073-2010, ГОСТ 19705-89, MTL-STD-104B, ARINC 403A DO-403A-160). Основними параметрами СЕП є номінальні значення напруги і частоти змінного струму [1; 5; 7; 8]. Із досвіду проектування та експлуатації різних типів ПС встановлено, що оптимальне падіння напруги в СЕП: для СЕП 115/200 В 400 Гц становить  $\Delta U = 4$  В, у СЕП = 27 В становить  $\Delta U = 1.5 \dots 3$  В.

### Аналіз приводного обладнання в СЕП ПС

Аналіз якості СЕП показує напрямок на ще більше обмеження діапазонів роботи СЕП в «нормальному» «ненормальному» та «аварійному» режимах роботи (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння вимог деяких НТД з якістю напруги СЕП ПС

Назва стандарту	Напруга будь-якої фази, В		
	Нормальний режим	Аварійний режим	Ненормальний режим
ГОСТ 19705–81	108–119	102–124	97–134
ГОСТ 19705–89	108–119	104–122	100–127
ГОСТ Р 54073–2010	108–118	108–118	100–126

Розглянемо привод постійної частоти обертання (ППЧО) на основі двох приводів: гідромеханічного та пневмомеханічного [2].

Першим розглянемо гідромеханічний привод (рис. 1). Керування для механічної характеристи-

ки гідроприводу можна записати в такому вигляді:

$$n = An_1 \operatorname{tg} \gamma - BM_n,$$

де  $n$  — швидкість обертання генератора;  $A$  — коефіцієнт конструктивних параметрів гідрома-

шин;  $n_1$  — швидкість обертання вхідного вала гідронасоса;  $\gamma$  — кут нахилу шайби гідронасоса;  $B$  — коефіцієнт втрат робочої рідини в гідромашинах;  $M_n$  — момент навантаження на вихідному валу гідромотору.

Змінюючи кут  $\gamma$ , за змінної швидкості обертання  $n_1$  можна отримати постійну величину швидкості  $n$ . У даному регуляторі реалізовано грубий та точний канали регулювання обертів. Похибка регулювання частоти грубого каналу складає 5–10 %. Точний канал працює на основі автоматичного регулятора. На виході резонансного контуру з'являється напруга, яка пропорційна відхиленню частоти обертів, потім після підсилення магнітним підсилювачем напруга підводиться до електродвигуна, за допомогою якого відбувається регулювання пружини 7 центрального маятника доти, доки не буде ліквідовано відхилення частоти обертання. Точний канал знижує похибку до 0,5–1 %. Охолодження робочої рідини виконується авіаційним паливом в паливно-масляному радіаторі, який розміщений окремо від системи привод-генератор. Принципова схема гідравлічного регулятора обертів показана на рис. 1

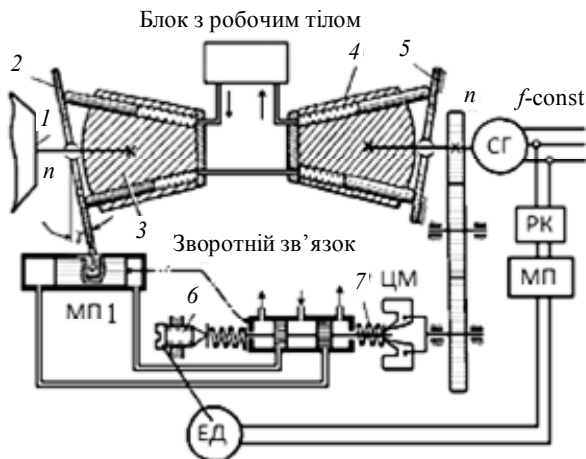


Рис. 1. Принципова схема гідравлічного регулятора обертів:

1 — авіадвигун; 3 — гідронасос; 4 — гідромотор; 2, 5 — наклонні шайби (шайба 5 має постійний кут нахилу); 6 — гвинт; 7 — регулювальна пружина центрального маятника; РК — резонансний контур; МП — магнітний підсилювач; СГ — синхронний генератор; ЦМ — центробіжний маятник; МП1 — механізм повороту шайби 2; ЕД — електродвигун

Недоліками гідромеханічного приводу є: збільшення маси за рахунок наявності системи охолодження за допомогою рідини, яка займає до 30 % від ваги приводу та є спільною охолоджувальною рідиною для безконтактного синхронного генератора; жорстка механічна характеристика в перехідних режимах роботи; досить складне обслуговування зі знанням гідравлічних та енергетичних систем.

Далі розглянемо пневмомеханічний привод (рис. 2).

Підведення повітря

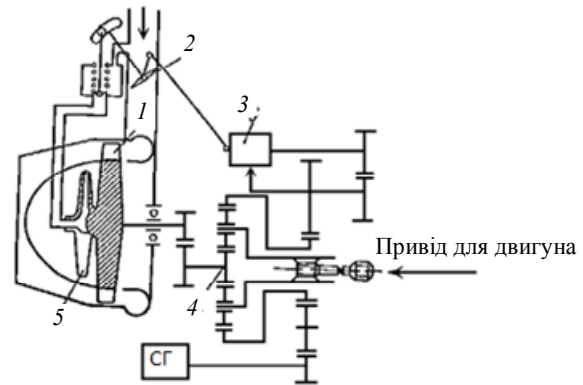


Рис. 2. Пневмомеханічний диференційний привод: 1 — активна осова турбіна; 2 — механізм регулювання потоком повітря; 3 — центробіжний регулятор; 4 — диференційний редуктор; 5 — сегнерове колесо, для режиму малого навантаження на генератор за великих частот обертання

Керування потужністю турбіни яка обертає генератор, відбувається або дроселюванням повітря на вході в турбіну, або зміною нахилу в лопатках соплового апарату. Другий спосіб складніший але більш ефективніший.

Стабільність частоти обертання генератора підтримується центр обіжним регулятором, чутливий елемент якого приводять в обертання з частотою, пропорційною частоті обертання ротора синхронного генератора. В діапазоні частот обертання приводного вала від  $n_{\min}$  до  $n_{\max}$  потужність до вала генератора підводять через диференційний редуктор від двох джерел: від приводного вала двигуна; турбіни. В діапазоні частот від  $n_0$  —  $n_{\max}$  турбіна працює в режимі торможення, обертаючись у зворотному напрямку, хоча повітря проходить через неї у тому самому напрямку.

Недоліками пневмомеханічного приводу є: механічна характеристика пневмомеханічного приводу значно м'якша, ніж у гідромеханічного приводу, що викликає збільшення часу стабілізації частоти та напруги в перехідних та аварійних режимах роботи систем електропостачання сучасних повітряних суден, та ускладнює виконання випробувальних заходів в умовах конструкторського бюро для забезпечення входження електричних параметрів до «трубки допусків» [1; 5], та ускладнює проектування та випробування нових СЕП ВС з урахуванням сучасних світових тенденцій та вимог [4; 6]; зменшення висотності роботи авіадвигуна в відборі частини повітря для роботи турбіни. В режимах зльоту та максимальної швидкості польоту відбір повітря від компресора викликає збільшення температу-

ри нагрівання лопаток турбіни двигуна; виникає потреба в наявності спеціального охолодження генератора за низьких навантажень.

**Рішення задачі дослідження**

Процеси частоти змінного струму повинні вписуватись в «трубку допусків», один з видів якої показаний на рис. 3.

Характерними причинами виходу напруги за «трубку допусків» у відмовний стан є такі причини: несправність каналу генерування; короткі замикання в каналі розподілу; перехідні процеси за невірною розрахунку навантажень на канал розподілу.

Залежності перехідних процесів в каналі СГ з системою автоматичного регулювання напруги (САРН) СГ з параметрами за часом протікання перехідних процесів показані у табл. 2, а в табл. 3 показано налаштування часу спрацювання захисту в випадку виходу параметрів за межі «трубки допусків».

З метою аналізу якості електричної енергії в каналах синхронного генератора (СГ) на рис. 4 показані перехідні процеси при значенні навантаження 50 % від номінальної потужності, та при стрибкоподібній зміні навантаження від 50 % до 150 % номінальної потужності.

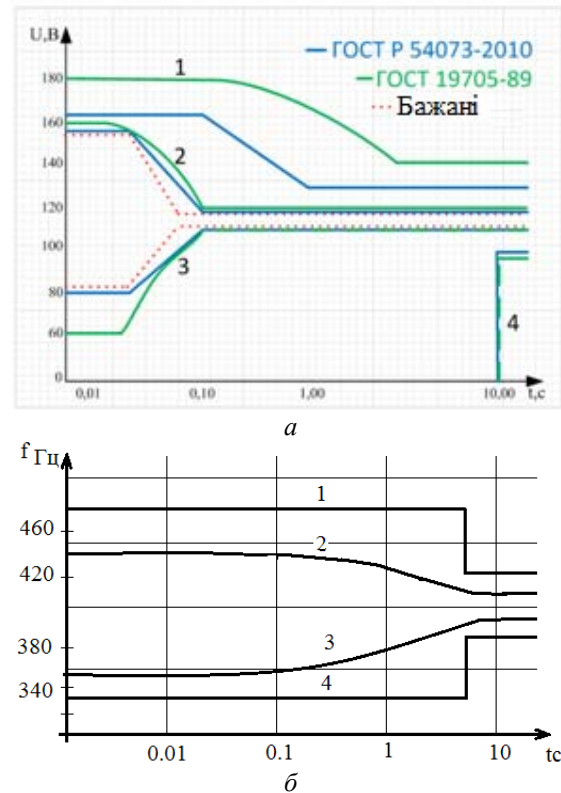


Рис. 3. «Трубка допусків» якості регулювання напруги (а) та частоти (б) за показниками якості НТД, а також бажані вимоги до якості напруги СЕП (а)

Таблиця 2

**Розрахункова схема побудови перехідних процесів каналу САРН СГ при «підвищенні» і «зниженні» навантаження та різних рівнях компаундування**

Перехідні процеси в САРН СГ	Варіювання параметрів СГ		Тривалість перехідних процесів <i>t<sub>p</sub></i> , мс						
			0	25	50	75	125	150	175
$U/f = \text{const}$ збільшення від 50 до 150 % навантаження мережі	$f = \text{var}$	$z'$	1	0,8	0,95	1,05	1	1	1
	$U = \text{const}$	$z''$	1	0,9	1,1	1	1	1	1
$U/f = \text{const}$ зменшення від 150 до 50 % навантаження мережі	$f = \text{var}$	$z'$	1	1,4	0,95	1	1,1	1	1
	$U = \text{const}$	$z''$	1	1,2	1	1	1,1	1	1
$U/f = \text{const}$ збільшення від 50 до 150 % навантаження мережі (змінений вид навантаження)	$f = \text{var}$	$z'$	1	0,65	0,9	1	1,05	1	1
	$U = \text{const}$	$z''$	1	0,75	1,1	1	1	1	1
$U/f = \text{const}$ зменшення від 150 до 50 % навантаження мережі (змінений вид навантаження)	$f = \text{var}$	$z'$	1	1,3	0,9	1	1,05	0,9	1
	$U = \text{const}$	$z''$	1	1,1	1	1	0,8	1	1
$U/f = \text{const}$ за різних ступенів компаундування за струмом	K1		1	0,95	1	1,05	1	0,95	1
	K2		1	0,90	1	1,1	0,95	0,95	1
	K3		1	0,85	1	1,05	0,95	1	1
$U/f = \text{const}$ за різних ступенів компаундування за струмом	K1		1	1,05	0,95	0,9	1,05	1,05	1
	K2		1	1,1	1	0,95	1	1,05	1
	K3		1	1,5	1,05	0,95	0,95	1,1	1

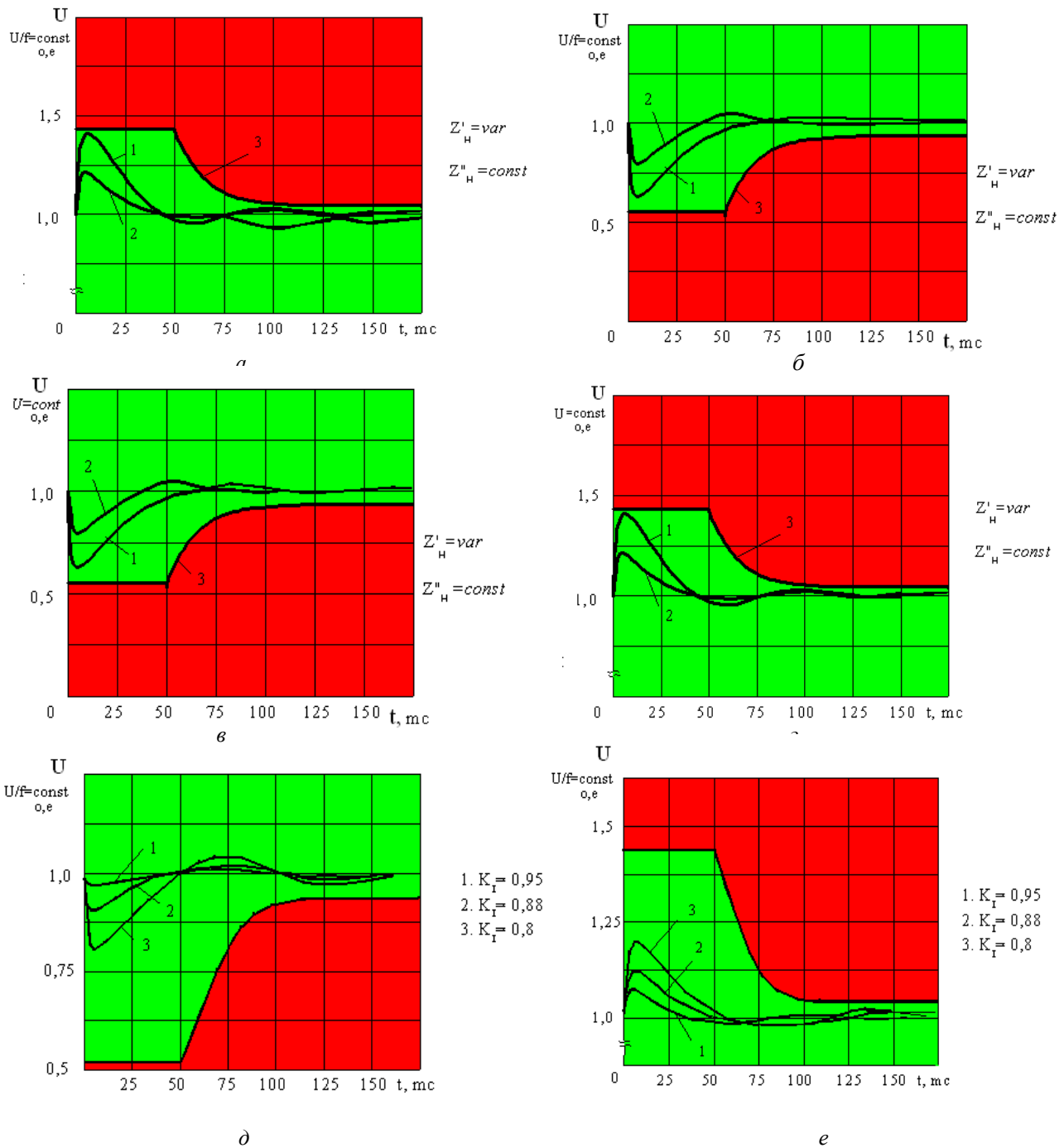


Рис. 4. Перехідні процеси в каналах СГ за різних режимах роботи:

*a* — результати розрахунку перехідного процесу по рівням вихідної напруги мережі за постійної складовій навантаження мережі  $U/f = \text{const}$  та збільшення від 50 до 150 % навантаження мережі  $U/f = \text{const}$   $f = \text{var}$ ; *б* — залежності перехідного процесу при зміні навантаження мережі  $U/f = \text{const}$   $f = \text{var}$  з рівня 150 до 50% номінального навантаження та 50 % навантаження мережі  $U/f = \text{const}$ ; *в* — залежності зміни рівня напруги обох мереж у перехідному режимі при зміні навантаження мережі  $U/f = \text{const}$  від 50 до 150 %; *г* — залежності перехідного режиму роботи при постійному рівні навантаження мережі  $U/f = \text{const}$   $f = \text{var}$ , що дорівнює 50 % номінальній потужності цієї мережі та зменшенням навантаження мережі від 150 до 50 % номінального навантаження; *д* — перехідні процеси підвищення навантаження мережі  $U/f = \text{const}$  за різних ступенів компаундування за струмом; *е* — перехідні процеси зниження навантаження мережі  $U/f = \text{const}$  за різних ступенів компаундування за струмом

Таблиця 3

**Режими роботи каналу САРН СГ та перехідні процеси при «підвищенні» і «зниженні» навантаження відповідно до налаштування спрацювання захисту**

Параметри режимів роботи САРН	Параметри перехідних процесів				
Час перехідного процесу, с, <i>t</i>	0	0,1	3,5	5	7
Регулювання напруги за нормальної роботи, В	70–160	80–150	115–120	108–119	108–119
Регулювання напруги за ненормальної роботи, В	0–180	0–170	0–130	0–127	104–127
Час налаштування таймера захисту, с, Тз.	5	5	7	7	7

На прикладі осцилограм, отриманих в процесі проведення випробувань СЕП ВС в умовах КБ [3] можна зробити висновок, що обладнання, яке обирається при проектуванні та застосовується у випробувальному процесі сучасних ПС, відповідає існуючим НТД (рис. 5, 6).

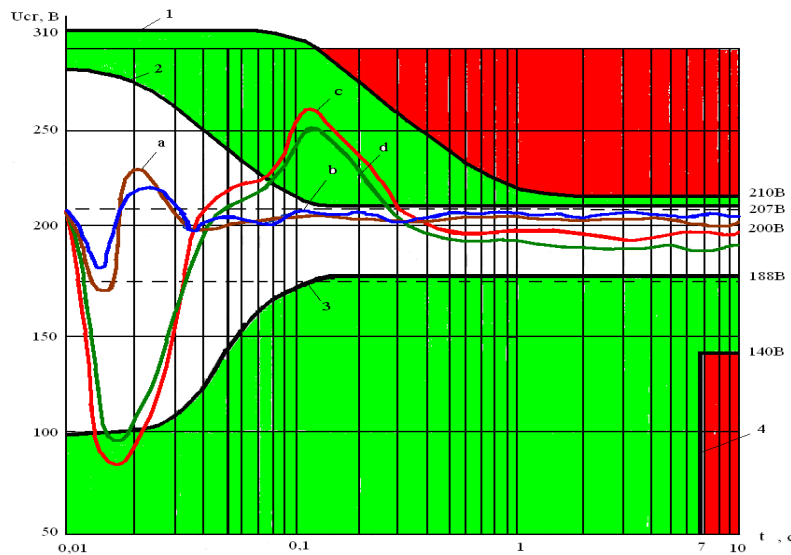


Рис. 5. Перехідні процеси напруги при увімкненні асинхронних двигунів на генератор ГТ40ПЧ6: *a* — пуск МТ-10 000, х.х. генератора, БРН120Т5; *b* — пуск МТ — 10 000 БРН120Т5, попереднє навантаження генератора:  $I_g = 0,5I_n, \cos \varphi = 0,8$ ; *c* — пуск АСД — 35000, х. х. генератора, БРН120Т5, попереднє навантаження генератора:  $I_g = 0,5I_n, \cos \varphi = 0,8$ ; *d* — пуск АСД — 35 000, БРН120Т5; попереднє навантаження генератора:  $I_g = 0,5I_n, \cos \varphi = 0,8$

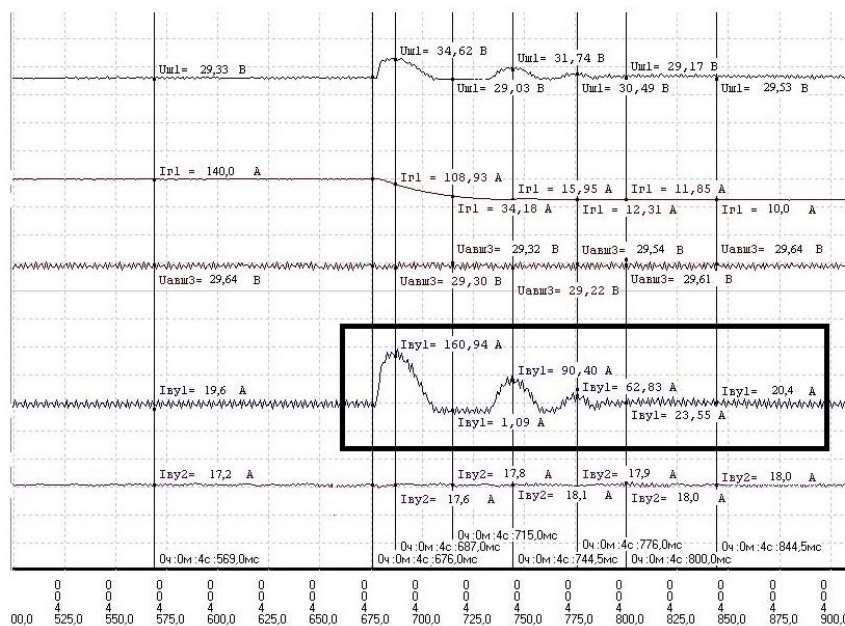


Рис. 6. Увімкнення 150 % навантаження потужності каналу генератора ГТ30 НЖЧ12 та стрибок струму на випрямному пристрої (виділений фрагмент)

### Висновок

Виконання вимог НТД в умовах нормальної, ненормальної та аварійної роботах СЕП ПС, а також в умовах перехідних процесів, потрібно виконувати при виборі приводу та генератора на основі аналізу складу споживачів на кожному конкретному літаку, який проектується. Якщо на літаку не передбачається наявності споживачів з великою одиничною потужністю, то бажана роздільна робота каналів СГ. У цьому випадку забезпечується велика надійність роботи СЕП ПС. Якщо на літаку передбачається наявність споживачів з великою одиничною потужністю (потужні насоси перекачування палива, потужні транспортні навантажувально-развантажувальні лебідки та ін.), то об'єднання каналів на паралельну роботу повинно відбуватись лише на етапах роботи потужних споживачів.

Сучасні тенденції розвитку авіаційної техніки вже призводять до підходу поступових відмов від жорсткого регулювання частот з допомогою ППЧО на окремих типах ПС, де відбувається перехід на споживачі, робота яких не залежить від суттєвих перепадів частоти змінного струму. Вихід на новий рівень впроваджуваного обладнання, повинен відповідати глобальному критерію експлуатації ПС — *забезпечення безпеки польотів авіаційних літаків*.

### ЛІТЕРАТУРА

- ГОСТ 19705-89. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Требования к качеству электроэнергии. — М. : ГК СССР по стандартам, 1989. — 45 с.
- Синдеев И. М., Савелов А. А. Системы электроснабжения воздушных судов. — М. : Транспорт, 1990. — 296 с.

- АКТ № 29-3340-05 «По результатам заводских лабораторных испытаний системы электрооборудования самолета Ан-148-100 (модель Ан-148-100А, Ан-148-100В, Ан-148-100Е). — К. : ДП «Антонов», 2005. — 120 с.

- Воробий В. М. Методика підвищення ефективності електротехнічного обладнання авіоніки на стадіях випереджувальних експлуатаційних стендових і доводочних випробувань/ В. М. Воробий, С. С Ільєнко // Автошляховик України. Вісник ЦНЦ ТАУ. — 2010. — № 13. — С. 117–127.

- ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. — М. : ФГУП «НИИСУ», ФГУП «НИИАО», 2010, электронная версия.

- Ільєнко С. С. Оценка качества электрической энергии электротехнических систем авионики современных воздушных судов в наземных условиях / С. С. Ильенко // Проблемы інформатизації та управління: зб. наук. праць. — К. : НАУ, 2013. — Вип. 3 (43). — С. 44–48.

- Ільєнко С. С. Побудова, експлуатація та технічне обслуговування централізованих бортових систем діагностики і вбудованих систем контролю авіоніки сучасних повітряних суден / С. С.Ільєнко, В. П.Захарченко, О. Ю. Курганський, В. В. Мухін // Наукоємні технології. — № 4 (32). — 2016. — С. 434–440, doi.org/10.18372/2310-5461.32.11188.

- Воробьёв В. М. Мінімізація ризиків ергатичного комплексу «екіпаж—повітряне судно—середовище». експлуатаційна статистика та людський фактор / В. М. Воробьёв, М. Ф. Давиденко, В. А. Захарченко, С. В. Енчев, С. С. Ильенко, В. В. Козуб // Електроніка та системи управління. — 2011. — № 4 (30). — С. 103–119, doi.org/10.18372/1990-5548.30.918.

Ільєнко С. С., Тихонов В. В.

## ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

*Стаття присвячена дослідженню та забезпеченню якості електричних параметрів систем електропостачання сучасного повітряного судна в умовах перехідних процесів у нормальних, ненормальних та аварійних режимах роботи. Проведений аналіз складу споживачів на сучасному повітряному судні, визначено вимоги міжнародних нормативно-технічних документів щодо показників якості електрообладнання повітряного судна, проведено вибір приводу та генератору з врахуванням специфіки умов нормальної, ненормальної та аварійної робіт системи електропостачання повітряного судна, а також умов перехідних процесів. Мета дослідження реалізована на прикладі оцінки якості електричної енергії в каналах синхронного генератора повітряного судна, де показані перехідні процеси при значенні навантаження 50 % від номінальної потужності, та при стрибкоподібній зміні навантаження від 50 до 150 % номінальної потужності.*

**Ключові слова:** система електропостачання повітряного судна; перехідний процес; міжнародна нормативно-технічна документація; нормальна, ненормальна та аварійна роботи

**Pyenko S. S., Tikhonov V. V.**

### **TRANSIENT PROCESSES OF ELECTRICAL PARAMETERS IN DIFFERENT MODES OF OPERATION OF AIR SUPPLY SYSTEMS IN THE DESIGN AND TESTING OF AVIATION EQUIPMENT**

*The article is devoted to the research and quality assurance of electrical parameters of modern air-conditioning systems in the conditions of transitional processes in normal, abnormal and emergency modes of operation. The analysis of the composition of the consumers on a modern aircraft, the requirements of international normative and technical documents concerning the parameters of the quality of electrical equipment of the aircraft, the choice of the drive and the generator, taking into account the specific conditions of normal, abnormal and emergency work of the air supply system, as well as in the conditions of the transitional processes, has been carried out. The purpose of the study is realized on the example of the estimation of the quality of electric energy in the channels of the synchronous generator of the aircraft, which shows transient processes at a load value of 50 % of rated power, and with a jump-like load change from 50 to 150 % of nominal power.*

**Keywords:** air supply system; transition process; international normative and technical documentation; normal, abnormal and emergency work.

**Ильенко С. С., Тихонов В. В.**

### **ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИСПЫТАНИЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

*Статья посвящена исследованиям и обеспечению качества электрических параметров систем электроснабжения современного воздушного судна в условиях переходных процессов в нормальных, ненормальных и аварийных режимах работы. Проведенный анализ состава потребителей на современном воздушном судне, определены требования международных нормативно-технических документов по показателям качества электрооборудования воздушного судна, проведен выбор привода и генератора с учетом специфики условий нормальной, ненормальной и аварийной работы системы электроснабжения воздушного судна, а также в условиях переходных процессов. Цель исследования реализована на примере оценки качества электрической энергии в каналах синхронного генератора воздушного судна, где показаны переходные процессы при значении нагрузки 50 % от номинальной мощности, и при скачкообразном изменении нагрузки от 50 до 150 % номинальной мощности.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения воздушного судна; переходный процесс; международная нормативно-техническая документация; нормальная, ненормальная и аварийная работа.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2018 р.

Прийнято до друку 23.02.2018 р.

Рецензент — д-р техн. наук, старш. наук. співроб. Шевчук Д. О.