

УДК 629.735.33.064.017.1

doi: 10.32620/aktt.2024.sup2.14

А. А. ЦАРЕВ

АТ «Елемент», Одеса, Україна

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАХИСТУ АВІАЦІЙНИХ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Робота зосереджена на аналізі та вдосконаленні методів електричного захисту стартер-генераторів постійного струму (СТГ) в авіаційних системах. Стартери-генератори відіграють критичну роль у запуску авіаційних двигунів та живленні бортових систем, тому їхня надійність є ключовим аспектом безпеки польотів. Досліджуються існуючі методи захисту СТГ від перевантажень за струмом, напругою, коротких замикань та зворотних струмів, які реалізовані в існуючих системах керування та захисту СТГ. Аналіз виявив кілька вразливостей у поточних системах захисту, зокрема низький рівень контролю температури та недостатню точність вимірювання струму через температурні коливання опору компенсаційної обмотки. Наукова новизна роботи полягає у розробці нових підходів до захисту стартер-генераторів, включаючи використання вбудованих датчиків температури для постійного моніторингу температури СТГ та впровадження алгоритмів компенсації значень струму залежно від температури. Також запропоновано застосування комбінованих трансформаторів струму, які здатні вимірювати постійний струм, що дозволяє забезпечити надійний захист від короткого замикання на корпус у будь-яких режимах роботи СТГ. Впровадження каналу інформаційного обміну для зв'язку з системою управління двигуном сприятиме підвищенню ефективності управління та захисту СТГ. Практичне значення роботи полягає у можливості підвищення надійності та ефективності роботи стартер-генераторів, що позитивно вплине на безпеку та стабільність функціонування авіаційних систем в цілому. Вдосконалення структури системи запуску і генерування включає використання вбудованих датчиків температури, комбінованих трансформаторів струму та каналу інформаційного обміну для забезпечення постійного контролю параметрів та ефективного управління СТГ. Ці вдосконалення сприятимуть підвищенню надійності, безпеки та ефективності роботи стартерів-генераторів, що є критично важливим для стабільного функціонування авіаційних систем. Запропоновані вдосконалення можуть бути впроваджені в існуючі системи захисту СТГ, що зменшить ризики відмов та аварійних ситуацій, покращить контроль за станом стартер-генераторів та підвищить загальну надійність авіаційних систем.

Ключові слова: стартер-генератори постійного струму; комплектуючі вироби авіаційної техніки; регулятор двигуна; блок запуску і генерування; трансформатори струму.

Вступ

Забезпечення надійної та ефективної роботи авіаційних систем є одним з ключових факторів для безпечної експлуатації повітряних суден. У цьому контексті СТГ постійного струму відіграють важливу роль, забезпечуючи як запуск авіаційних двигунів, так і живлення бортових систем. Ці пристрої піддаються значним електричним і механічним навантаженням, що робить їх уразливими до різних видів відмов і аварійних ситуацій. Надійна робота СТГ постійного струму критично важлива для підтримання функціональності і безпеки авіаційних систем у цілому.

Одним з основних аспектів, що впливають на надійність СТГ постійного струму, є захист від електричних пошкоджень і зовнішніх впливів. Електричні пошкодження, такі як короткі замикання, перевантаження за струмом і перенапруги, можуть призвести до серйозних наслідків, включаючи пошкодження

обладнання, вихід з ладу критично важливих систем і навіть загрозу безпеці польотів.

АТ «Елемент», як сертифікований розробник і виробник комплектуючих виробів авіаційної техніки (КВ АТ), має у своєму арсеналі не лише регулятори режимів роботи авіадвигуна (РДЦ), але і системи управління і захисту авіаційних СТГ, до яких належать блоки запуску і генерування (БЗГ).

Постановка задачі

У зв'язку з розробкою нових систем управління СТГ і модернізацією існуючих, виникла задача детального аналізу реалізованих методів захисту СТГ, виявлення вразливостей та формування сучасних рекомендацій до нових та існуючих систем захисту авіаційних СТГ постійного струму. У рамках поставлених завдань необхідно:

— провести аналіз і оцінку реалізованих підходів та методів захисту СТГ, які застосовуються в

існуючих системах управління та захисту авіаційних СТГ.

- визначити основні проблеми та недоліки реалізованих рішень захисту СТГ, які можуть призвести до відмов і аварійних ситуацій.
- розробити рекомендації і вимоги до нових систем захисту, заснованих на виявлених вразливостях і передових технологіях.

Результати

Одним з напрямів діяльності АО “Елемент” є розробка і виготовлення блоків БЗГ (рисунк 1) для СТГ постійного струму потужністю 9 і 12 кВт, українського і зарубіжного виробництва. БЗГ є частиною системи запуску і генерування (СЗГ) літального апарату (ЛА) і виконує такі функції:

- забезпечення запуску двигуна на землі і в польоті;
- підтримання заданої напруги генерування;
- забезпечення перехресного запуску і паралельної роботи СТГ;
- захист СТГ і систем ЛА від аварійних ситуацій.



Рис. 1. Блоки запуску і генерування БЗ

В системі запуску і генерування, структура якої наведена на рисунку 2, БЗГ керує силовими контакторами запуску (КЗап), який забезпечує запуск від акумуляторної батареї (АКБ) або наземного джерела, силовими контакторами завантаження (КЗав), який забезпечує включення генератора в бортову мережу та струмом збудження в послідовній обмотці збудження СТГ ($U_{збуд}$). БЗГ формує сигнали управління на основі заданих алгоритмів і вимірних значень напруги бортової мережі ($U_{бм}$), напруги генерування ($U_{ген}$), струму СТГ ($I_{ген}$) і обертів СТГ ($N_{ген}$).

В БЗГ реалізовані наступні функції захисту:

- захист від перевантажень за струмом;
- захист за напругою;
- захист від зворотних струмів;

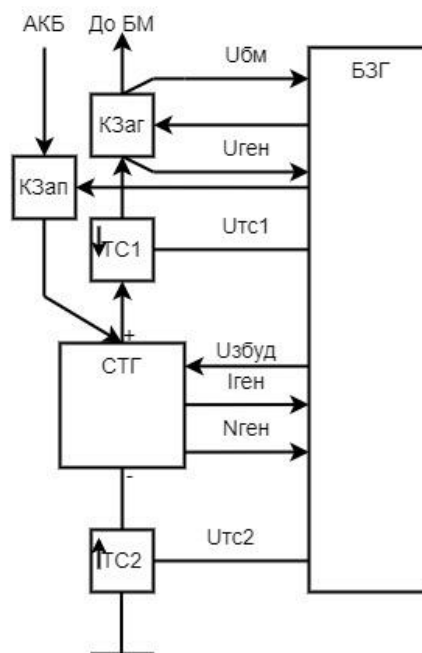


Рис. 2. Структура СЗ

- захист від короткого замикання на корпус вихідних клем СТГ.

Захист від перевантажень за струмом має два пороги спрацювання: підвищений струм і граничний струм. При підвищених значеннях струму генерації запускається таймер, після відліку якого БЗГ знімає керуючу напругу з обмотки збудження і відключає силові контактори. Для СТГ, з якими взаємодіє БЗГ, час таймера становить 3 - 6 с і значення підвищеного струму 600 А. Якщо струм досягає граничних значень (800 А), то БЗГ переходить у режим обмеження струму генерації на рівні граничного значення, до тих пір, поки не спрацює тимчасовий захист за перевищення порогу підвищеного струму.

Захист за напругою має три пороги спрацювання: знижена напруга, підвищена напруга і гранична напруга. При наявності зниженої або підвищеної напруги на виході СТГ, що працює в генераторному режимі, БЗГ запускає таймер, після відліку якого знімається керуюча напруга з обмотки збудження і відключаються силові контактори навантаження генератора. У випадку, якщо напруга генерування досягає граничного значення, спрацьовує швидкий захист – за час до 5 мс БЗГ відключає силові контактори і знімає напругу збудження.

Завданням захисту від зворотних струмів є забезпечення алгоритмів, при яких мінімізується ризик зміни напрямку струму генератора. Якщо блок фіксує зміну напрямку струму СТГ, що працює в генераторному режимі, після закінчення заданого часу відбувається відключення силових контакторів. Також, з метою виключення самої ситуації зміни напрямку

струму СТГ, БЗГ контролює напругу бортової мережі перед включенням силового контактора навантаження СТГ – якщо напруга бортової мережі більша за напругу генерації, то БЗГ блокує включення силового контактора навантаження.

Захист від короткого замикання на корпус вихідних клем СТГ базується на аналізі струмів у плюсовому і мінусовому силових фідерах СТГ. За наявності різниці струмів БЗГ відключає силовий контактор навантаження СТГ і знімає керуючу напругу з обмотки збудження.

Основним компонентом СЗГ при захисті СТГ є трансформатори струму (ТС1, ТС2), які постачаються і використовуються разом з БЗГ і забезпечують диференційний захист СТГ від короткого замикання його силових клем на корпус. Трансформатори струму працюють у парі і підключаються послідовно синфазно, при цьому з протифазною установкою. Один трансформатор струму (ТС1) встановлюється на плюсовий фідер, а другий – на мінусовий. Трансформатори струму приведені на рисунку 3.



Рис. 3. Трансформатори струму

Для аналізу роботи диференційного захисту (ДЗ) СТГ від короткого замикання, виконано симуляцію його роботи за допомогою SPICE моделювання (рис. 4). При штатному включенні СТГ (час симуляції до 0,5 с), у процесі його навантаження (зміна параметра $I(\text{Gen})$ з кроком 200 А), на виходах ТС1 і ТС2 формуються сигнали однакової амплітуди за модулем, але різної полярності, тому результуюче значення $V(\text{ТС1,ТС2})$ прагне до нуля. У разі витoku струму на корпус в обхід ТС1 або ТС2 (час симуляції від 0,5 с до 0,9 с, сигнал $V(\text{kz})$), на їх виходах з'являється різниця за амплітудою і результуюча напруга $V(\text{ТС1,ТС2})$ приймає значення більше 5 В. Сигнал такого рівня фіксується БЗГ, обробляється і в результаті відбувається відключення силового контактора навантаження і знімається керуюча напруга з обмотки збудження.

Для більш наочного відображення роботи ДЗ виконано симуляцію при змінному струмі від СТГ (рис. 5). Із симуляції видно, що трансформатори

струму видають сигнал наявності короткого замикання безперервно, на відміну від систем з постійним струмом, де сигнал видається імпульсно при зміні навантаження генератора.

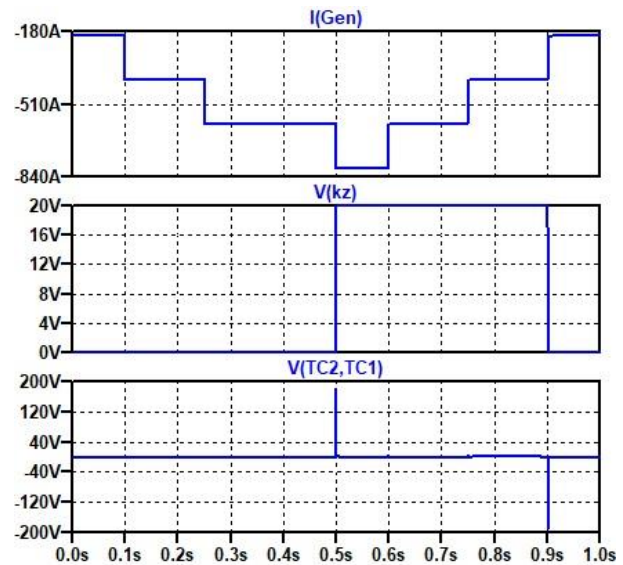


Рис. 4. Моделювання роботи захисту від короткого замикання СТГ на корпус (при постійному струмі)

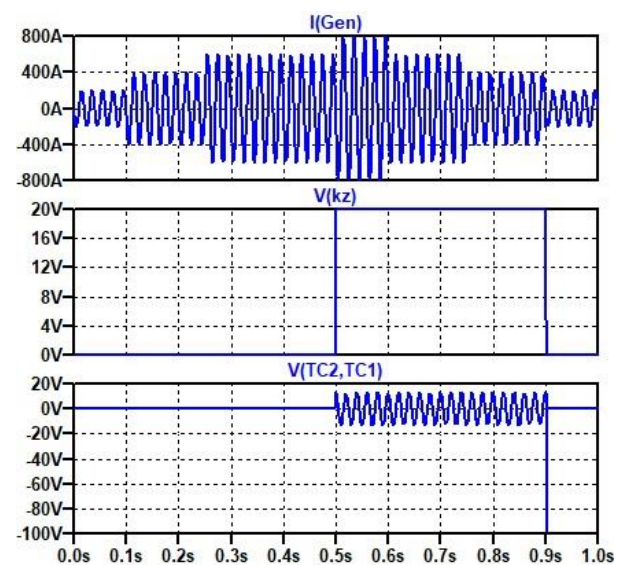


Рис. 5. Моделювання роботи захисту від короткого замикання СТГ на корпус (при змінному струмі)

Аналіз вище перелічених реалізованих захистів СТГ показав наступні уразливості та недоліки:

- низький рівень контролю температури СТГ;
- низька точність вимірювання струму СТГ;
- уразливість до коротких замикань на корпус у разі плавної зміни навантаження генератора.

Низький рівень контролю температури СТГ обумовлений включенням індикатора перегріву СТГ, за яким пілот повинен виконувати задані алгоритми дій і дотримання пауз між запусками. Температурний захист заснований лише на вимогах до запуску і

індикації перегріву СТГ і не має кількісної оцінки температури СТГ.

Низька точність вимірювання струму СТГ обумовлена використанням компенсаційної обмотки СТГ в ролі вимірювального шунта. У процесі роботи СТГ компенсаційна обмотка піддається температурним впливам і може змінювати свій опір, внаслідок чого може відбуватися спотворення виміряних значень струму СТГ.

Уразливість до коротких замикань на корпус у разі плавної зміни навантаження генератора обумовлена специфікою роботи трансформаторів струму: вони можуть працювати тільки з змінною складовою (змінний струм або перехідний процес), тому плавна зміна навантаження генератора не викличе формування сигналу потрібної амплітуди, необхідного для фіксації блоком БЗГ і подальшого виконання алгоритмів захисту.

Виходячи з виявлених вразливостей можна сформулювати наступні рекомендації:

- використовувати в конструкції СТГ вбудований датчик температури, при цьому вимірювання і контроль температури виконуватиме блок БЗГ;

- впровадження алгоритмів компенсації значень від компенсаційної обмотки залежно від температури СТГ або застосування зовнішніх, стійких до зміни температури, вимірювальних шунтів;

- використовувати комбіновані трансформатори струму з вузлами, призначеними для вимірювання постійного струму;

- впровадження в БЗГ каналу інформаційного обміну (КІО).

- На основі сформованих рекомендацій можна сформулювати доопрацьовану структуру СЗГ (рис. 6). Основними особливостями доопрацьованої СЗГ є:

- використання комбінованих трансформаторів струму;

- використання вбудованого датчика температури СТГ;

- використання КІО для зв'язку з системою управління двигуном (РДЦ).

Комбіновані трансформатори струму дозволяють контролювати струм СТГ як при перехідних процесах так і в постійному режимі, коли струм навантаження СТГ не змінюється. Це дозволяє аналізувати струм плюсовому ($I_{генТС1}$) та мінусовому ($I_{генТС2}$) у будь-якому режимі роботи СТГ.

Використання вбудованого датчика температури в конструкції СТГ дозволить виконувати постійний контроль температури СТГ ($t_{ген}$) за допомогою БЗГ. Отримані значення БЗГ може використовувати для аналізу стану СЗГ, контролю стану СТГ при запуску двигуна, оповіщення про перевищення заданої температури СТГ.

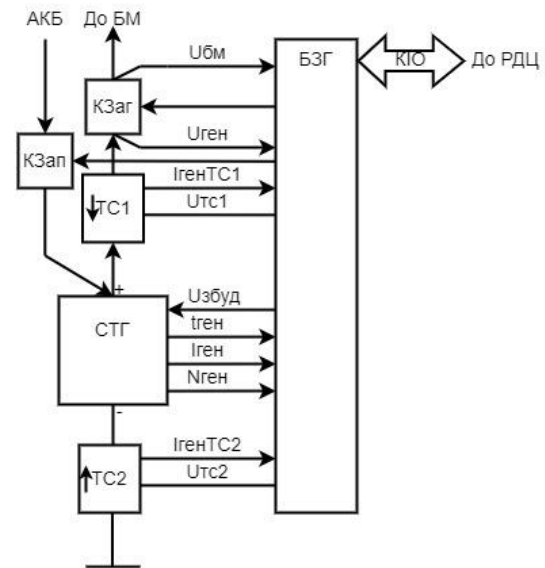


Рис. 6. Модернізована структура системи запуску і генерування

Застосування каналу інформаційного обміну (КІО) з РДЦ забезпечить додатковий контроль параметрів СТГ, розширений контроль відмов СТГ та управління БЗГ за допомогою цифрових команд.

Висновок

1. Проведений аналіз реалізованих методів захисту БЗГ в СЗГ виявив вразливості які впливають на точність контролю струму СТГ та стійкість СТГ до температурних впливів.

2. Розроблені рекомендації дозволяють підвищити надійність та контролепридатність системи запуску та генерування ЛА.

3. Перспектива проведеної роботи передбачає вдосконалення існуючих БЗГ та використання отриманих результатів при створенні нових БЗГ.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося за фінансової підтримки АТ «Елемент».

Наявність даних

Дані будуть надані за обґрунтованим запитом.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що він не використовував методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Подяка

Автор висловлю подяку Директору-Головному конструктору АТ «Елемент» **Ранченку Геннадію Степановичу**.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Цалимов, Г. Ф. Разработка электронных блоков управления стартер-генераторами для систем запуска авиационных двигателей [Текст] / Г. Ф. Цалимов, С. В. Козюра, & Е. Е. Васько // *Вестник двигателестроения*. - 2015. - №2 – С. 102-106.
2. Буряченко, А. Г. Стенд-имитатор стартер-генератора с функцией имитации работы двух стартер-генераторов на общую бортовую сеть [Текст] / А. Г. Буряченко, Г. Ф. Цалимов, & А. А. Царев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – №8 (152) – С. 123-127. DOI: 10.32620/aktt.2018.8.19.
3. Буряченко, А. Г. Обеспечение испытаний бортовых блоков управления стартер-генераторами [Текст] / А. Г. Буряченко, & А. А. Царев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2021. –

№4sup1 (173) – С. 138-143. DOI: 10.32620/aktt.2021.4sup1.19.

References

1. Tsalimov, G., Kozura, S. V., & Vasko, E. *Razrabotka elektronnykh blokov upravleniya starter-generatorami dlya sistem zapuska aviatsionnykh dvigateley*. [Development of starter-generators CONTROL UNIT for starting system of aviation engines] *Vestnik dvigatelestroeniya - Engine building messenger*, 2015, no. 2, pp. 102-106.
2. Burjachenko, A. G., Tsalimov, G. F., & Tsarev, A. A. *Stend-imitator starter-generatorov s funkciej imitacii raboty dvuh starter-generatorov na obshhuju bortovuju set'* [On-board starter-generator control unit tests providing]. *Aviacijno-kosmichna texnika i tehnologiya - Aerospace Technic and Technology*, 2018, no.8 (152), pp. 123-127. DOI: 10.32620/aktt.2018.8.19.
3. Buryachenko, A., Tsarev, A. *Obespecheniye ispytaniy bortovykh blokov upravleniya starter-generatorami*. [On-board starter-generator control unit tests providing]. *Aviacijno-kosmichna texnika i tehnologiya - Aerospace Technic and Technology*, 2021, no. 4sup1 (173), pp. 138-143. DOI: 10.32620/aktt.2021.4sup1.19.

Поступила до редакції 07.06.2024, розглянута на редколегії 15.08.2024

METHODS AND MEANS OF ENSURING ELECTRICAL PROTECTION FOR AVIATION DC STARTER-GENERATORS

Andrii Tsarev

This work focuses on the analysis and improvement of electrical protection methods for DC starter-generators (SG) in aviation systems. Starter generators play a critical role in starting aircraft engines and powering onboard systems, making their reliability a key aspect of flight safety. Existing protection methods for SG against overcurrent, overvoltage, short circuit, and reverse currents, which are implemented in current SG control and protection systems, are being studied. The analysis revealed several vulnerabilities in current protection systems, including low temperature control levels and insufficient accuracy in current measurements due to temperature fluctuations in the compensating winding resistance. The scientific novelty of this work lies in the development of new approaches to protecting starter generators, including the use of embedded temperature sensors for continuous SG temperature monitoring and the implementation of algorithms for current value compensation depending on the temperature. The use of combined current transformers capable of measuring the DC current and providing reliable short-circuit protection to the casing in any SG operating mode is also proposed. The introduction of an information exchange channel for communication with the engine control system enhances the efficiency of SG management and protection. The practical significance of this work is its potential to increase the reliability and efficiency of starter generators, positively impacting the safety and stability of aviation systems as a whole. The improvement of the starter and generating system structure includes the use of embedded temperature sensors, combined current transformers, and an information exchange channel to ensure constant parameter control and effective SG management. These improvements will contribute to the increased reliability, safety, and efficiency of starter generators, which is critically important for the stable operation of aviation systems. The proposed improvements can be integrated into existing SG protection systems to reduce the risks of failures and emergency situations, improve the monitoring of starter-generator conditions, and enhance the overall reliability of aviation systems.

Keywords: DC starter generators; component products of aviation equipment; engine regulator; launch and generation unit; current transformers.

Царев Андрій Анатолійович – інженер АТ «Елемент», Одеса, Україна.

Andrii Tsarev – Engineer of JSC “Element”, Odesa, Ukraine,
e-mail: odessa@element.od.ua, ORCID: 0000-0001-6768-1494.