

В. М. Кутін<sup>1</sup>  
 В. І. Голінько<sup>2</sup>  
 О. О. Шпачук<sup>1</sup>

## ПРИСТРІЙ ЗАХИСТУ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, ЩО ПРАЦЮЄ В БЛОЦІ З ТРАНСФОРМАТОРОМ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет;  
<sup>2</sup>ДВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ

*Запропоновано пристрій захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора. Пристрій працює в блоці з трансформатором, який розраховує та реагує на струм в місці виникнення замикання на землю, шляхом використання комбінованого принципу накладання постійного струму на коло, що містить ізоляцію обмотки статора для визначення активного опору ізоляції обмотки статора відносно землі, використання енергії розряду попередньо зарядженого конденсатора для визначення перехідного опору в місці замикання на землю, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора відносно землі.*

**Ключові слова:** синхронний генератор, однофазне замикання на землю, релейний захист.

### Вступ

Правилами технічної експлуатації регламентується обмеження струму однофазного замикання на землю для генераторів, що працюють в блоці з трансформатором, на рівні 5 А (для машин потужністю до 160 МВт) та 2 А (для машин потужністю більше 300 МВт). Основним недоліком усіх типів захистів від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора є те, що вони не контролюють значення струму замикання на землю, а в основу спрацювання захисту покладений контроль параметрів, що опосередковано характеризують аварійний режим роботи машини, наприклад, контроль напруги нульової послідовності першої гармоніки і напруги третьої гармоніки, або контроль накладеного на коло статора постійного чи змінного струму. До недоліків існуючих захистів також можна віднести нечутливість до виникнення однофазних замикань на землю обмотки статора поблизу нейтралі, нечутливість захистів при симетричному зниженні параметрів ізоляції обмотки статора. Зазначені вище недоліки можуть призводити до хибних спрацювань захисту.

Зважаючи на значний час експлуатації більшості потужних синхронних генераторів, велику вартість ремонтних робіт, а також робіт з модернізації генераторів, актуальнішою стає проблема забезпечення достатнього рівня чутливості та швидкодії пристроїв релейного захисту та автоматики.

### Результати дослідження

З метою усунення зазначених вище недоліків у Вінницькому політехнічному інституті розроблено захист від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, який ґрунтується на комбінованому методі накладання постійного струму та використання енергії попередньо зарядженого конденсатора [1, 2].

Для підвищення швидкодії та чутливості захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, в роботі запропоновано метод та пристрій захисту, який розраховує та реагує на струм в місці виникнення замикання на землю, шляхом використання комбінованого принципу накладання постійного струму на коло, що містить ізоляцію обмотки статора для визначення активного опору ізоляції обмотки статора відносно землі, використання енергії розряду попередньо зарядженого конденсатора для визначення перехідного опору в місці замикання на землю, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора відносно землі.

Отримане значення стуму порівнюється з нормованим і в разі відхилення захист подає команду на вимкнення синхронного генератора від мережі, на сигнал і автомат гасіння поля. Принципова схема пристрою захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором показана на рис. 1.

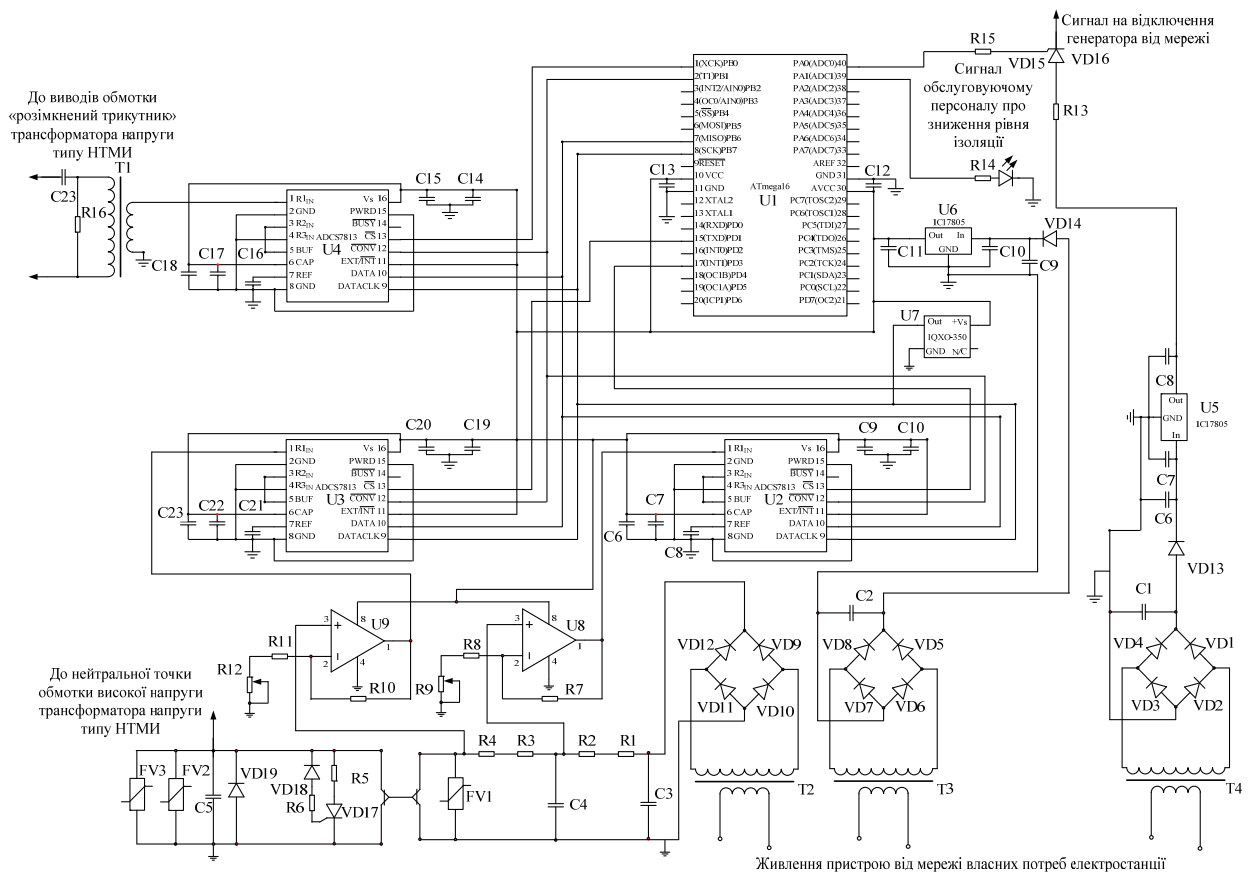


Рис. 1. Принципова схема пристрою захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором

Джерелом постійного струму, що накладається на обмотку статора є понижувальний трансформатор Т2 з діодним мостом VD9—VD12 та конденсатор С3. Після випрямлення напруги відбувається заряд конденсатора С4 і постійний струм через обмежувальні резистори R1 і R3, шунти R2 і R4 подається до нейтральної точки обмотки високої напруги трансформатора напруги типу НТМИ і звідти — на статорну обмотку СГ.

Для живлення вихідних кіл пристрої передбачено окремий блок живлення, що включає в себе трансформатор Т4, діодний міст VD1—VD4 та конденсатор для зменшення рівня пульсації С1. Випрямлена напруга подається на вхід стабілізатора напруги U5 через діод VD13. До цього кола також входять конденсатори С6—С8, які використовуються у типовій схемі приєднання стабілізатора напруги. До вихідного кола також входить резистор R13, який формує вихідний струм і транзистор VD16, виконуючий роль електронного ключа.

Блок обробки інформації отримує живлення від понижувального трансформатора Т3 через діодний міст VD5—VD8, конденсатор С2 та стабілізатор напруги U6. Типова схема під'єднання U6 включає в себе діод VD14 та конденсатори С9—С11. До типової схеми під'єднання мікроконтролера (МК) U1 входять конденсатори С12 та С13, що включаються між виводами живлення та виводами заземлення МК.

МК U1 реалізує логічну частину роботи пристрою захисту, керує АЦП U2-U4, а також вихідними колами пристрою. Після подачі живлення на МК починається виконання програми роботи захисту. МК налагоджує зв'язок з АЦП і після витримки часу, який необхідний для заряджання конденсатора С4, починає виконання процедури первинних вимірювань. Для цього на U2—U4 подається сигнал про початок перетворення. Зв'язок між МК та АЦП реалізований завдяки стандартному послідовному інтерфейсу передачі даних. Зовнішній генератор тактових імпульсів U7 отримує живлення від U6 і служить для синхронізації роботи МК та периферійних пристроїв.

АЦП U2—U4 та виконують перетворення сигналів у цифрову форму. До типових схем під'єднання АЦП входять конденсатори: для U2 — C6—C10; для U3 — C19—C23; U4 — C14—C18. Після подачі сигналу на перетворення відбувається опитування входів МК щодо подачі сигналу від АЦП про завершення перетворення. Після отримання такого сигналу відбувається зчитування інформації з АЦП та її оброблення, тобто перетворення цифрових сигналів у значення контрольованих параметрів. АЦП U4 перетворює у цифрову форму сигнал напруги нульової послідовності, який надходить з вторинної обмотки «розімкнутий трикутник» трансформатора типу НТМИ через R-C фільтр (до складу фільтра входять конденсатори C23 та резистор R16) та проміжний трансформатор T1. Після перетворення сигналу у цифровій формі передається U1 для подальшої обробки за таким співвідношенням

$$U_0 = U_S k_T, \quad (1)$$

де  $U_0$  — напруга нульової послідовності;  $U_S$  — сигнал напруги нульової послідовності, що надходить від T1 до U4;  $k_T$  — підсумковий коефіцієнт трансформації, що враховує коефіцієнт трансформації трансформатора напруги та проміжного трансформатора. [3, 4]

Сигнал струму, що накладається на обмотку статора вимірюється за допомогою використання шунта R2 та операційного підсилювача (ОП) U8. До типових елементів монтажу ОП U8 входять резистори R7—R9. Після підсилення сигнал струму, що накладається на обмотку статора, надходить до АЦП U2, де відбувається перетворення його в цифрову форму та передавання для подальшої обробки в МК U2 за співвідношенням

$$R_\Sigma(I_1) = \frac{U}{I_1} - R_1 - R_3 - R_T, \quad (2)$$

де  $I_1$  — сигнал постійного струму, що надходить від операційного підсилювача U8 до U2 та U1;  $R_1, R_3$  — опори резисторів  $R_1, R_3$ ;  $R_T$  — активний опір обмотки високої напруги трансформатора напруги [4].

Аналогічно відбувається контроль струму розряду конденсатора C4 за допомогою ОП U9, АЦП U3 та ЦМК U1 згідно зі співвідношенням

$$R_p(I_2) = \frac{s + fI_2}{1 + gI_2 + hI_2^2}, \quad (3)$$

де  $I_2$  — сигнал постійного струму, що надходить від операційного підсилювача U9 до АЦП U3 та до МК U1;  $s, f, g, h$  — коефіцієнти, що обумовлюються параметрами обмежувальних резисторів а також активним та індуктивним опором первинної обмотки трансформатора напруги типу НТМИ [4].

Після завершення перетворення значень  $R_{iz}, R_p$  та  $U_0$  процедура первинних відмірювань завершується. Після завершення процедури первинних вимірювань запускається основний цикл програми. Основний цикл роботи програми починається з подачі сигналу з МК на АЦП для початку перетворення і знову виконується вищеописаний алгоритм. Після отримання значень  $R_{iz}, R_p$  та  $U_0$  відбувається виконання логічної частини роботи захисту. У випадку зниження рівня опору ізоляції нижче встановленого рівня відбувається подача світлового сигналу обслуговуючому персоналу від U1 через R14 та світлодіод VD15. В іншому випадку відбувається визначення наявності аварійного режиму та розрахунок значення примусової складової струму O33 обмотки статора [1] за таким виразом:

$$I = 3 \frac{U_0 R_p + U_0 R_\Sigma + U_0 R_p \omega^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + U_0 \omega C_\Sigma R_\Sigma^2}{\sqrt{2} (\omega^2 R_p^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + R_p^2 + 2R_p R_\Sigma + R_\Sigma^2)}; \quad (4)$$

$$R_\Sigma = \frac{R_A R_B R_C}{R_A R_B + R_B R_C + R_A R_C}; \quad (5)$$

$$C_\Sigma = C_A + C_B + C_C, \quad (6)$$

де  $C_A, C_B, C_C$  — ємність обмотки статора фаз  $A, B$  та  $C$ , відповідно;  $R_A, R_B, R_C$  — опір ізоляції обмотки статора фаз  $A, B$  та  $C$ , відповідно;  $R_\Sigma$  — загальний опір ізоляції обмотки статора;  $C_\Sigma$  — загальна ємність ізоляції обмотки статора;  $R_p$  — перехідний опір в місці замикання на землю;  $U_0$  — максимальне значення напруги нульової послідовності.

У випадку, якщо розраховане значення струму  $I_{\Sigma}$  обмотки статора перевищує уставку спрацювання, відбувається подача сигналу з  $U_1$  через  $R_{15}$  на ключ  $VD_{16}$  для відключення генератора від мережі та включення автомату гасіння поля. В іншому випадку, тобто тоді коли аварійний режим роботи генератора не виявлено МК подає команду АЦП для початку перетворення нової вибірки сигналів.

Блок-схема алгоритму роботи пристрою захисту показана на рис. 2.

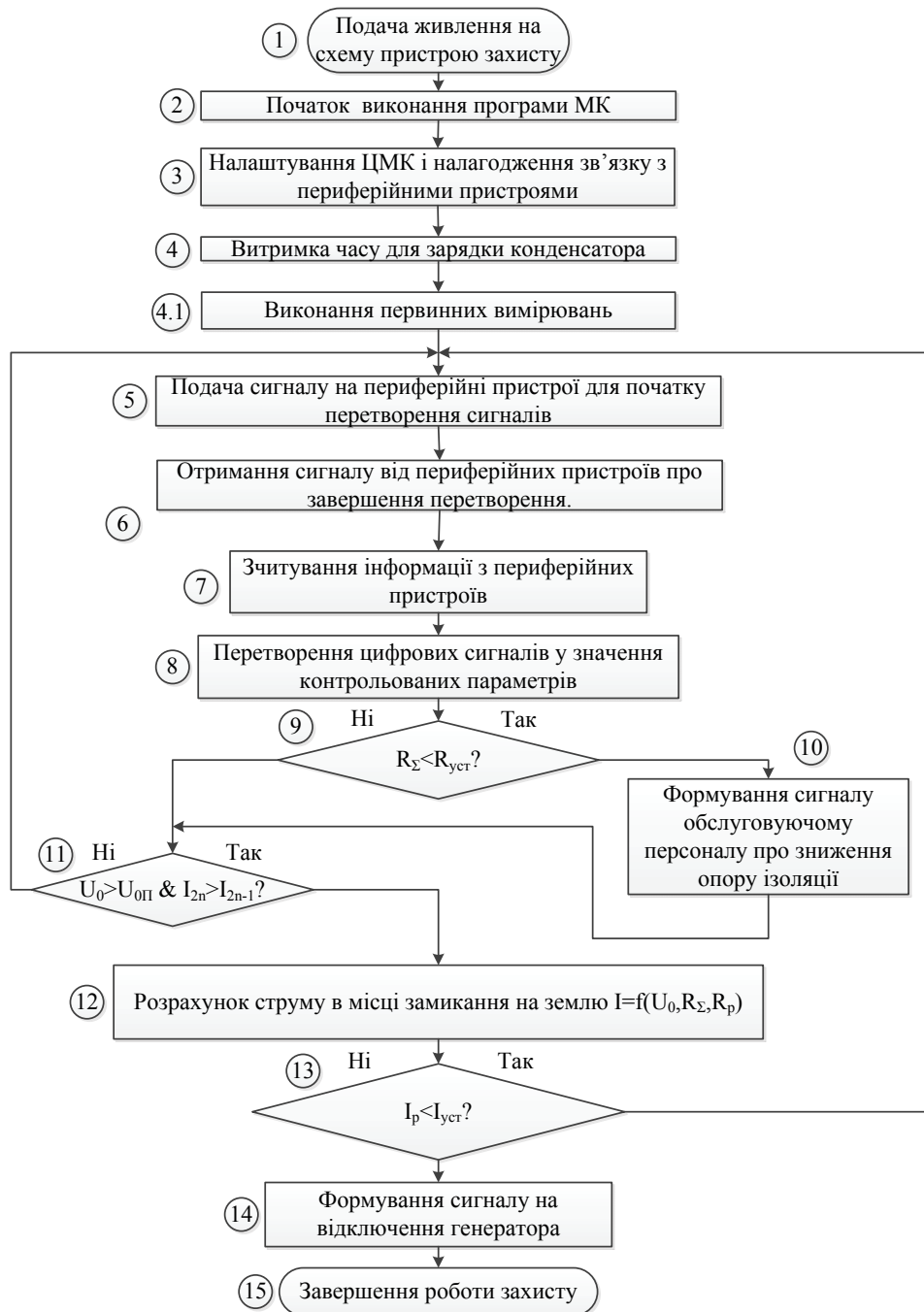


Рис. 2. Узагальнена блок-схема алгоритму роботи пристрою захисту

## Висновки

Запропоновано принципову схему пристрою захисту синхронного генератора, який працює в блоці з трансформатором, від однофазних замикань на землю обмотки статора. Схема реалізує новий спосіб захисту, що ґрунтується на використанні комбінованого принципу накладання постійного струму на коло, яке містить ізоляцію обмотки статора для визначення активного опору

ізоляції обмотки статора відносно землі, використанні енергії розряду попередньо зарядженого конденсатора для визначення перехідного опору в місці замикання на землю, контролі напруги нульової послідовності та врахуванні ємності ізоляції обмотки статора відносно землі й розрахунку струму однофазного замикання на землю обмотки статора в аварійному режимі. Також запропоновано алгоритм роботи пристрою захисту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. А. с. 1171898 СССР Устройство для защиты статора генератора в блоке с трансформатором от замыканий на землю / В. М. Кутин, В. Н. Вишнеvский, А. В. Кобылянський, А. Е. Рубаненко ; опубл. 1985, Бюл. № 29.
2. А. с. № 1224892 (СРСР) Устройство для защиты блоков генератор-трансформатор от замыканий на землю / В. М. Кутин, В. Н. Вишнеvский, А. В. Кобылянський, А. Е. Рубаненко, С. А. Новак. Б. В. ; опубл. 1986, Бюл. № 14.
3. Кутін В. М. Сукупність контрольованих параметрів та параметр спрацювання пристрою захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Молодий вчений. — 2014. — № 12. — С. 13—16.
4. Кутін В. М. Моделювання струму в реактивному органі пристрою захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2013. — № 6. — С. 48—51.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 21.01.2016

**Кутін Василь Михайлович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті;

**Шпачук Олександр Олександрович** — аспірант кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, e-mail: gramozeko89@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Голінько Василь Іванович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри аерології та охорони праці.

ДВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ

V. M. Kutin<sup>1</sup>  
V. I. Golinko<sup>2</sup>  
O. O. Shpachuk<sup>1</sup>

## Protection Device against Single-Phase Ground Fault of Stator Winding Synchronous Generator Working in Block with Transformer

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

<sup>2</sup>National Mining University, Dnipropetrovsk

*There has been offered a device that protects against single-phase ground fault of the stator winding of the synchronous generator operating in a block with a transformer which calculates and responds to the current in the location of the ground fault, by using the combined principle of superposition of direct current to the circuit comprising the stator winding insulation for determining resistance stator winding insulation with respect to ground, using discharge energy previously charged capacitor for determining the transitional resistance at the site of an earth fault, zero-sequence voltage monitoring and accounting of the capacity of the stator winding insulation with respect to ground.*

**Keywords:** synchronous generator, single-phase ground fault relay protection.

**Kutin Vasyl M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electromechanic Systems of Automation in Industry and on Transport;

**Golinko Vasyl I.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Aerology and Labour Protection;

**Shpachuk Oleksandr O.** — Post-Graduate Student of the Chair of Electromechanic Systems of Automation in Industry and on Transport, e-mail: gramozeko89@mail.ru

**В. М. Кутин<sup>1</sup>**  
**В. И. Голинько<sup>2</sup>**  
**А. А. Шпачук<sup>1</sup>**

## **Устройство защиты от однофазных замыканий на землю обмотки статора синхронного генератора, работающего в блоке с трансформатором**

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет  
<sup>2</sup>ГВУЗ «Национальный горный университет», Днепропетровск

*Предложено устройство защиты от однофазных замыканий на землю обмотки статора синхронного генератора, работающего в блоке с трансформатором, которое рассчитывает и реагирует на ток в месте возникновения замыкания на землю, путем использования комбинированного принципа наложения постоянного тока на цепь, содержащую изоляцию обмотки статора для определения активного сопротивления изоляции обмотки статора относительно земли, использование энергии разряда предварительно заряженного конденсатора для определения переходного сопротивления в месте замыкания на землю, контроля напряжения нулевой последовательности и учета емкости изоляции обмотки статора относительно земли.*

**Ключевые слова:** синхронный генератор, однофазные замыкания на землю, релейная защита.

**Кутин Василий Михайлович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте;

**Голинько Василий Иванович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой аэрологии и охраны труда;

**Шпачук Александр Александрович** — аспирант кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: gramozeko89@mail.ru