

**АНДРУШКО СТАНІСЛАВ ЛЕОНІДОВИЧ** ✉ – аспірант кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, головний інженер ТОВ «Подільтехналадка»; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7846-517X>; e-mail: stanislav.andrushko@gmail.com.

**КУЛИК ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ** – доктор технічних наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7594-5661>; e-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com.

## ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ОБМОТКИ РОТОРА СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ НА ОСНОВІ ІНЖЕКЦІЇ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ НАПРУГИ

Стаття присвячена аналізу сучасних методів захисту обмотки ротора синхронного генератора від замикань на землю та обґрунтуванню шляхів їх удосконалення з урахуванням реальних умов експлуатації в енергетичних системах України. Особливу увагу приділено проблемі своєчасного виявлення першого замикання на землю, оскільки саме воно створює передумови для аварійного другого замикання, що супроводжується значними струмами, тепловими перевантаженнями, механічними пошкодженнями ротора, підшипників та активних частин генератора. Актуальність теми обумовлена частим погіршенням стану ізоляції обмоток ротора на синхронних генераторах малої та середньої потужності (1,5–12 МВт), що призводить до тривалих аварійних зупинок, вартісних ремонтів і значних економічних втрат. Проаналізовано недоліки традиційних електромеханічних систем захисту, які досі експлуатуються на багатьох електростанціях. Детально розглянуто три основні сучасні принципи безперервного онлайн-контролю ізоляції кола збудження. Для кожного методу описано фізичні принципи дії та основні переваги, зокрема завадостійкість до гармонік статичних систем збудження, незалежність від місця пошкодження, усунення ефекту поляризації ізоляції завдяки періодичній зміні полярності, можливість точного обчислення опору ізоляції. Виявлено характерні обмеження методів, зокрема необхідність зовнішніх блоків інжекції та зв'язку, потреба в періодичному калібруванні, відносна складність монтажу та інтегрування до існуючих систем релейного захисту. На підставі проведеного аналізу та математичного моделювання обґрунтовано доцільність розробки окремого спеціалізованого мікропроцесорного реле контролю ізоляції ротора, незалежного від багатифункціональних терміналів генераторного захисту. Для підтвердження теоретичних положень та ілюстрації застосування перспективного методу інжекції напруги у формі меандру виконано транзитивне моделювання в середовищі LTSpice та натурний експеримент.

**Ключові слова:** замикання на землю; синхронний генератор; реле контролю ізоляції; метод інжекції змінної напруги; метод інжекції постійної напруги; метод інжекції напруги прямокутної форми; збудження; струм витoku; паразитна ємність.

**Вступ.** Синхронний генератор є одним із ключових та найбільш відповідальних елементів електроенергетичної системи, від надійності роботи якого безпосередньо залежить стабільність виробництва електричної енергії. Особливу увагу під час експлуатації таких машин необхідно приділяти станам несправності, зокрема внутрішнім пошкодженням ротора. Одним із характерних видів внутрішніх дефектів є замикання на землю обмотки збудження. Перше замикання на землю, як правило, не призводить до негайного виходу машини з ладу, однак створює передумови для виникнення повторного замикання, яке може спричинити коротке замикання в обмотці збудження з великими струмами, значними електромагнітними зусиллями та небезпечними тепловими навантаженнями. Наслідками таких процесів є порушення симетрії магнітного поля, механічні навантаження на ротор і підшипникові вузли, а також серйозні пошкодження активних частин генератора [1]. В умовах сучасної енергетики України, особливо на синхронних генераторах малої та середньої потужності (1,5–12 МВт), останнім часом все частіше фіксується погіршення ізоляції обмоток ротора, що призводить до обривів або замикань обмотки збудження на корпус і супроводжується тривалими та дороговартісними ремонтами. У зв'язку з цим питання своєчасного виявлення замикань на землю в колі збудження ротора та застосування ефективних схем захисту є

надзвичайно актуальним і потребує детального аналізу та вдосконалення.

**Мета дослідження** полягає у підвищенні чутливості та надійності захисту обмотки ротора синхронного генератора від замикань на землю шляхом вдосконалення методу та розроблення засобу ідентифікації першого замикання. Для досягнення мети виконано порівняльний аналіз сучасних методів контролю ізоляції та захисту обмотки ротора синхронного генератора від замикань на землю, обґрунтовано доцільність застосування методу інжекції низькочастотної напруги прямокутної форми в умовах впливу паразитних ємностей та особливостей статичних систем збудження, а також досліджено чутливість та інформативність методу шляхом моделювання процесів замикання на землю в середовищі LTSpice та виконання натурального експерименту.

**Недоліки традиційних систем захисту ротора синхронного генератора (на прикладі КЗР-2).** На значній кількості електростанцій України, оснащених синхронними генераторами радянського виробництва, для контролю замикань на землю в колі збудження ротора досі використовується комплект захисту типу КЗР-2. Даний пристрій належить до електромеханічних засобів релейного захисту та призначений для виявлення другого замикання на землю в обмотці збудження після виникнення первинного дефекту ізоляції. Разом з тим, у реальних умовах експлуатації

© С. Л. Андрушко, В. В. Кулик, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*  
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

КЗР-2 нерідко перебуває у відключеному стані або використовується виключно для сигналізації, оскільки його введення в роботу потребує виконання низки регламентних дій, точного балансування мостової схеми та наявності персоналу з відповідною кваліфікацією і практичним досвідом налаштування електромеханічних захистів.

Принцип дії КЗР-2 базується на чотириплечій мостовій схемі, підключеній до обмотки збудження генератора. У разі появи другого замикання на землю відбувається порушення балансу моста, що супроводжується виникненням напруги на його діагоналі та спрацюванням поляризованих реле з формуванням сигналу або команди на відключення. Залежність характеристик чутливості захисту від стану ізоляції кола збудження, параметрів налаштування та умов експлуатації суттєво ускладнює його застосування в сучасних умовах і обмежує ефективність використання КЗР-2 як засобу забезпечення надійної роботи ротора генератора.

**Аналіз сучасних принципів побудови систем захисту обмотки ротора синхронного генератора від замикань на землю.** Захист від замикання на землю обмотки ротора синхронного генератора повинен забезпечувати контроль усього кола збудження генератора та надійне виявлення першого замикання на землю, оскільки поява другого замикання є неприпустимою з точки зору безпеки та надійності роботи генератора. У зв'язку з цим пристрої сигналізації першого замикання на землю повинні відзначатися високою надійністю та стійкістю до хибних спрацювань, адже кожен сигнал такого захисту потребує обов'язкової перевірки експлуатаційним персоналом.

Найбільш поширеним підходом до контролю ізоляції обмотки ротора є введення допоміжної напруги в коло збудження, що дає змогу визначати появу замикання ротора на землю. Залежно від характеру цієї напруги, у практиці релейного захисту застосовуються різні принципи побудови відповідних схем [2, 3].

На сьогодні можна виділити три основні методи захисту від замикання ротора генератора на землю:

- метод із введенням змінної напруги промислової або підвищеної частоти;
- метод із введенням постійної напруги;
- метод, що базується на введенні низькочастотної напруги прямокутної форми сигналу.

**Метод інжекції змінної напруги промислової частоти.** Метод вимірювання ізоляції кіл ротора відносно землі за допомогою інжекції змінного струму є одним із найпоширеніших способів безперервного онлайн-контролю та захисту обмотки збудження синхронного генератора від замикання на землю. На відміну від класичних офлайн-перевірок ізоляції мегомметром, цей метод працює постійно під час експлуатації машини, дозволяючи виявляти навіть перше замикання на землю, що є критичним для потужних турбогенераторів і гідроенергетичних генераторів [4].

Принцип дії базується на інжекції в обмотку ротора змінної напруги (зазвичай у діапазоні 20–100 В, частотою 50 Гц). Джерело цієї напруги підключається до кола збудження через конденсатор, який пропускає змінний струм, але надійно блокує проходження постійної складової напруги збудження (яка може досягати сотень вольт) та струмообмежувальний резистор. Другий полюс джерела інжекції з'єднується із землею безпосередньо або через чутливий вимірювальний елемент (рис. 1). У нормальному стані обмотка ротора повністю ізолювана від землі, тому через контур інжекції протікає лише незначний емнісний струм, який не впливає на захист. При однофазному замиканні на землю (навіть з високим опором) утворюється замкнений контур: джерело змінної напруги → розділовий конденсатор → ділянка обмотки → точка замикання → земля → джерело. У контурі протікає помітний змінний струм інжекції, значення якого залежить від місця та опору замикання. Цей струм фіксується чутливим органом (зазвичай струмовим реле), який видає сигнал «Замикання на землю в одній точці» [1].

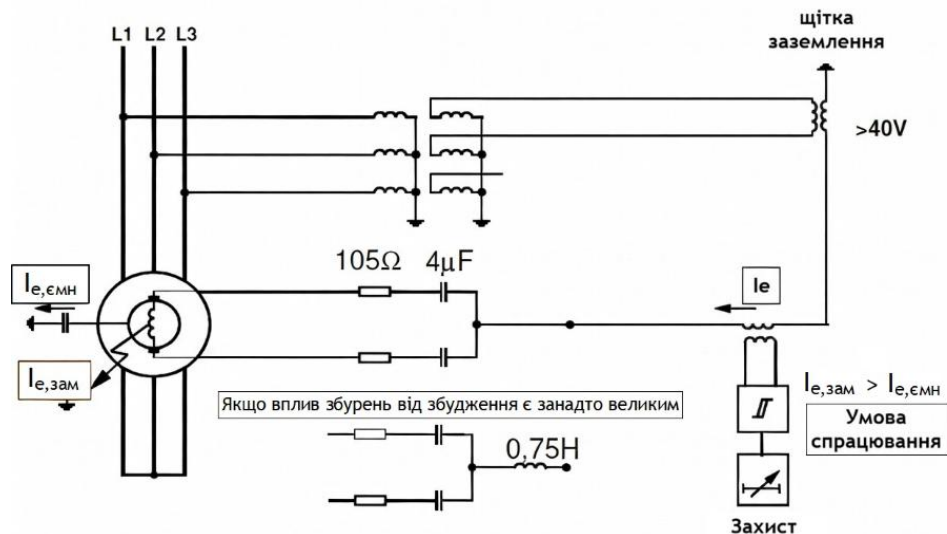


Рисунок 1 – Схема захисту ротора від замикання на землю методом інжекції змінної напруги

**Метод інжекції постійної напруги.** Метод інжекції постійної напруги – це надійний спосіб безперервного онлайн-контролю ізоляції обмотки збудження синхронного генератора відносно землі, який часто застосовується як альтернатива або вдосконалення методу з використанням змінної напруги. Він особливо ефективний у системах зі статичним або безщитковим збудженням, де потрібно уникнути впливу гармонік і ємнісних струмів. Принцип полягає в інжекції невеликої постійної напруги (20–60 В) через обмежувальний резистор в коло збудження, з одним полюсом підключеним до ротора, а другим – до землі. За нормальної ізоляції струм витoku мінімальний [5].

При замиканні на землю в будь-якій точці обмотки формується контур, через який протікає помітний постійний струм витoku. Реле вимірює цей струм (або розраховує опір ізоляції) і фіксує падіння опору нижче порогу. При першому замиканні видається сигнал, при другому – можливе відключення.

Схема включає джерело постійної напруги, обмежувальний резистор, вимірювальний шунт і цифровий орган реле. Чутливість висока – реєструє опір до кількох кОм (див. рис. 2).

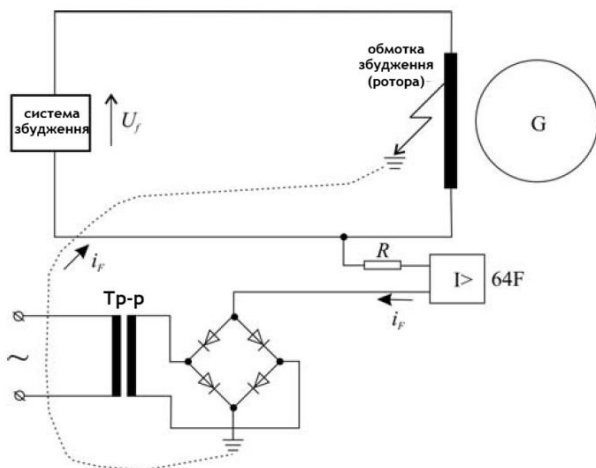


Рисунок 2 – Схема захисту ротора від замикання на землю методом інжекції постійної напруги

**Переваги:** простота, відсутність проблем з ємнісними струмами та гармоніками, стабільна чутливість незалежно від місця замикання, низька ймовірність хибних спрацьовувань, точне вимірювання опору ізоляції.

**Недоліки** методу інжекції постійної напруги полягають у обмеженій інформативності щодо характеру пошкодження ізоляції, оскільки в більшості реалізацій він забезпечує переважно виявлення замикання на землю без можливості достовірного оцінювання місця виникнення пошкодження та ступеня деградації ізоляції [5, 6]. Чутливість методу залежить від точки виникнення замикання в колі збудження та може суттєво знижуватися у разі пошкоджень, що розташовані у центральній частині обмотки ротора, порівняно із замиканнями поблизу

полюсів підключення системи контролю. Додатковим обмеженням є вплив поляризаційних процесів в ізоляції за тривалої дії постійної напруги, що супроводжується накопиченням зарядів у діелектрику, зміною струмів витoku та потенційним погіршенням стабільності та чутливості системи контролю ізоляції.

Як результат, чутливість захисту суттєво знижується, що призводить до ризику пропуску несправності коли система не фіксує вчасно або взагалі факт зниження опору ізоляції. Крім того, у разі раптового зняття напруги або зміни полярності виникає зворотний деполаризаційний струм, який може генерувати перешкоди та спричиняти хибні спрацьовування захисту [5].

Для усунення цієї вразливості сучасні реалізації методу інжекції постійної напруги застосовують періодичне перемикання полярності (зазвичай у формі низькочастотної квадратної хвилі  $\pm U$  з частотою 0,25–1 Гц). Такий підхід постійно «перезапускає» процес поляризації, підтримує контрольований рівень струму витoku в кожному напівперіоді, забезпечує стабільну чутливість до змін опору ізоляції незалежно від тривалості роботи, значно підвищує завадостійкість і усуває ефект «звикання» ізоляції до постійного поля [6].

**Метод інжекції низькочастотної напруги прямокутної форми (меандру).** Даний метод є сучасним вдосконаленням традиційних підходів до безперервного онлайн-моніторингу ізоляції обмотки збудження синхронного генератора відносно землі, що особливо ефективний у системах з високим коефіцієнтом гармонік від статичного збудження, де класичні АС- або DC-методи можуть втрачати чутливість.

Принцип побудови захисту наведено на рис. 3. Метод реалізований у низці промислових зразків, зокрема у пристроях Schneider MiCOM P391, Siemens 7UM85, ABB REG670 та ін. Типова реалізація передбачає використання зовнішнього блоку інжекції, зв'язку та вимірювання, який генерує напругу у формі меандру низької частоти (зазвичай 0,25–4 Гц, з можливістю вибору через внутрішній зв'язок), амплітудою близько  $\pm 15$ –50 В, і симетрично подає її в коло ротора через високоомні резистори з одним полюсом підключеним до заземлюючої щітки через низькоомний вимірювальний шунт [7, 8].

За нормального рівня ізоляції після кожної зміни полярності виникає лише короточасний зарядний струм через ємність ротора до землі, який швидко згасає до нуля в усталеному режимі [9]. У разі замикання на землю формується замкнений контур, де протікає постійний струм витoku  $I_e$ , значення якого залежить від опору замикання  $R_e$ . Ключова особливість полягає у вимірюванні усталеного струму в обох напівперіодах ( $I_{L1}$  для позитивної та  $I_{L2}$  для негативної полярності), з подальшим розрахунком  $I_{\text{замик}} = (I_{L1} - I_{L2})/2$ . Це усуває зміщення від напруги збудження, зменшує залежність від положення пошкодження в обмотці та мінімізує вплив ємнісних струмів (рис. 4).

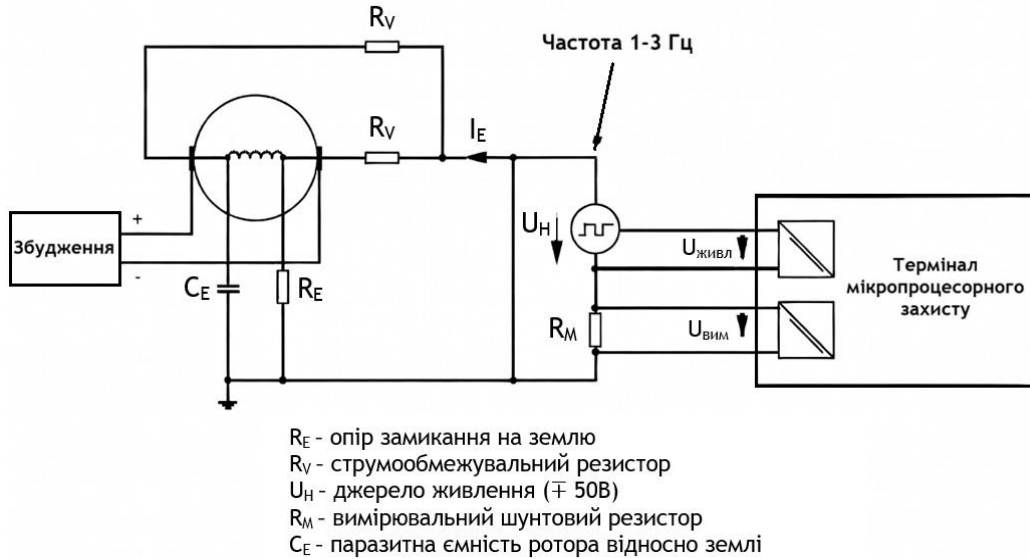


Рисунок 3 – Схема захисту ротора від замикання на землю методом інжекції напруги прямокутної форми

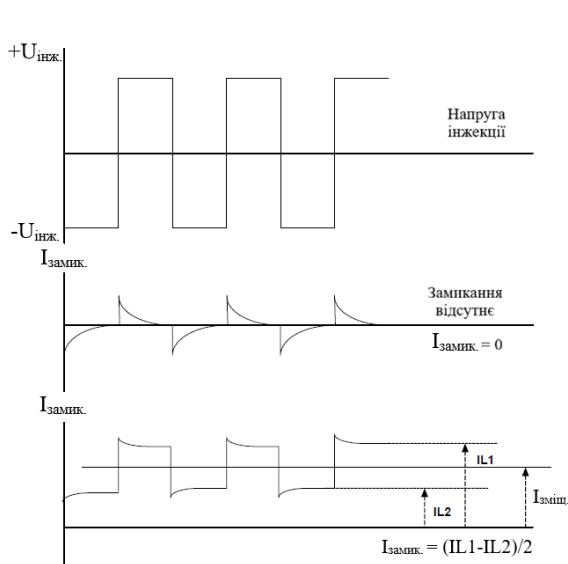


Рисунок 4 – Принцип роботи методу інжекції напруги квадратної форми

Згідно з еквівалентною схемою (рис. 5), резистор  $R_{\text{вимір}}$  використовується як шунт для вимірювання струму в контурі за стаціонарного режиму. Вимірюючи напругу на шунті, визначають струм в контурі, який, в свою чергу, використовується для розрахунку опору замикання  $R_{\text{замик}}$  [10].

Опір замикання розраховується за формулою:

$$R_{\text{замик}} = \frac{U_{\text{інж}}}{\frac{U_{\text{вимір}}}{R_{\text{вимір}}}} - R_{\text{джерела}} - R_{\text{обмежув}} - R_{\text{вимір}} - R_{\text{поверн}} \quad (1)$$

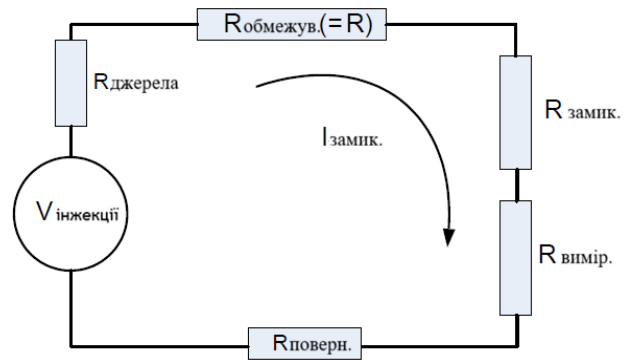


Рисунок 5 – Принцип роботи методу інжекції напруги прямокутної форми

Серед переваг методу – висока чутливість, незалежність від гармонік та ємнісних ефектів, усунення впливу поляризації ізоляції завдяки періодичному перемицанню (на відміну від методу інжекції постійного струму), ширший діапазон вимірювань порівняно з інжекцією змінного струму, точніше обчислення опору з фільтрацією перешкод, а також можливість реалізації двоступеневої структури захисту з незалежними аварійними сигналами (наприклад, якщо  $R < 10 \text{ кОм}$ ) та сигналами відключення (якщо  $R < 2 \text{ кОм}$ ) з регульованими затримками.

**Моделювання перехідних станів в середовищі LTSpice.** Для ілюстрації методу інжекції низькочастотної напруги прямокутної форми за відсутності замикання на землю  $R_{\text{замик}} \rightarrow \infty$  було виконано симуляцію в середовищі LTSpice (рис. 6).

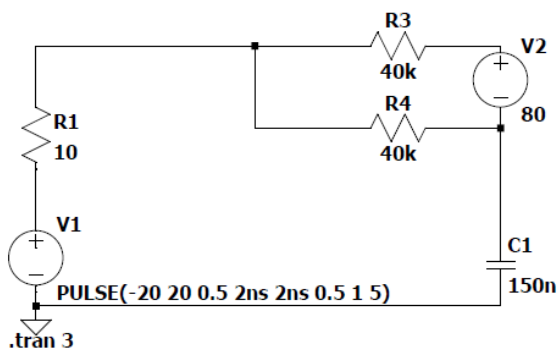


Рисунок 6 – Розрахункова схема для симуляції інжекції низькочастотної напруги без замикання на землю

Паразитна ємність обмотки ротора відносно землі змодельована конденсатором  $C1 = 0,15$  мкФ, що відповідає типовому значенню для синхронних генераторів малої та середньої потужності. Інжектвана напруга генерується джерелом V1 у формі меандру амплітудою  $\pm 20$  В з частотою 1 Гц (період – 1 с, довжина фронту – 2 нс). Симетричне підключення до кола ротора реалізовано через два струмообмежувальних резистори  $R3 = R4 = 40$  кОм (еквівалентний опір заряду/розряду становить біля 20 кОм на перехід).

Постійна складова напруги збудження представлена джерелом  $V2 = 80$  В.

Результати симуляції (графік напруги на вузлі інжекції V(n001) та струму через ємність I(C1)), зображені на рис. 7, повністю підтверджують теоретичні положення, зокрема:

- за кожної зміни полярності ( $\pm 20$  В) через ємність C1 протікає короткочасний імпульс зарядного

(або розрядного) струму з піковим значенням  $\approx \pm 1,0-1,2$  мА (близько до теоретичного  $I_{\text{імп}} \approx 20 \text{ В} / 20 \text{ кОм} = 1 \text{ мА}$ );

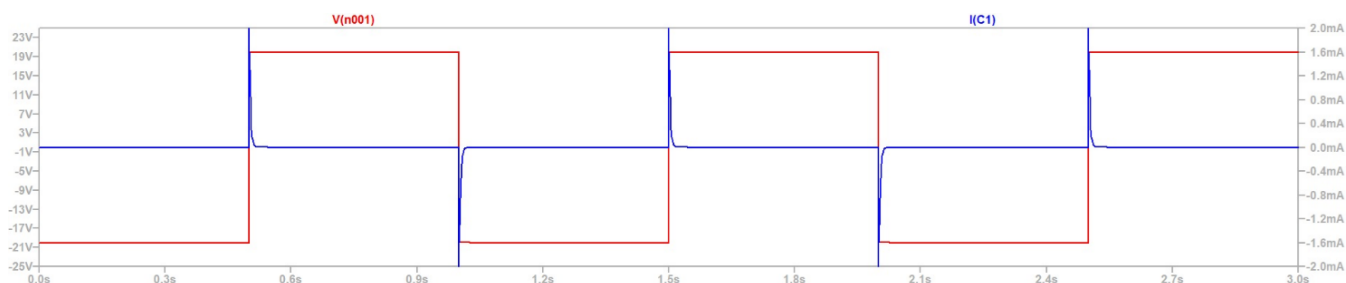
- після завершення перехідного процесу струм через ємність падає практично до нуля (менше 0,01 мА) і утримується на цьому рівні до наступної зміни полярності (усталений режим);

- постійна складова від джерела V2 (80 В) практично не впливає на амплітуду імпульсів струму, оскільки вони зумовлені лише зміною напруги інжекції.

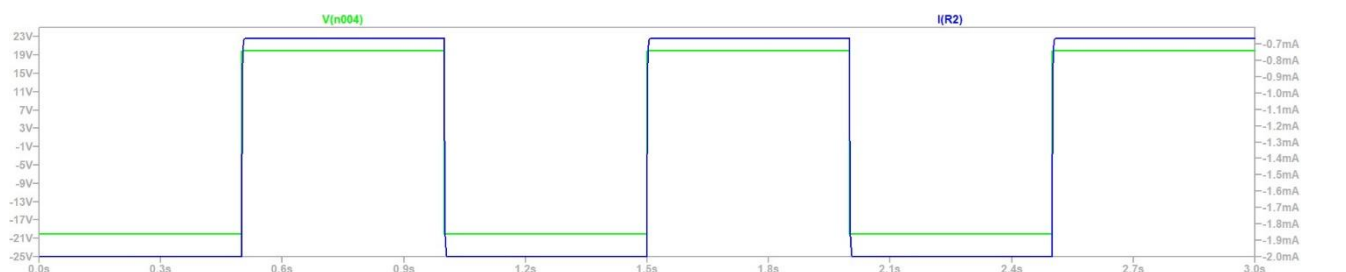
- Це демонструє ключову перевагу методу: при високій ізоляції (відсутність замикання на землю) в усталеному режимі кожного напівперіоду струм витoku відсутній, а вимірювальний орган фіксує лише короткочасні зарядні/розрядні імпульси, які швидко згасають. Така поведінка дозволяє надійно відрізнити нормальний стан від реального замикання на землю, де струм витoku залишатиметься постійним і ненульовим після перехідного процесу.

- Для ілюстрації методу інжекції низькочастотної напруги прямокутної форми за наявності замикання на землю була виконана симуляція в LTSpice за розрахунковою схемою, поданою на рис. 8. Замикання змодельовано резистором  $R2 = 10$  кОм.

- Після завершення перехідного процесу струм через резистор R2 (що відтворює струм витoku через замикання) залишається постійним і відмінним від нуля ( $\approx \pm 0,7-1,0$  мА залежно від полярності), що чітко вказує на наявність замикання на землю з опором 10 кОм (див. рис. 7).



а) за відсутності замикання на землю



б) за наявності замикання на землю

Рисунок 7 – Графік симуляції процесу інжекції змінної напруги прямокутної форми:

V(n001) – зміни напруги на вузлі інжекції, I(C1) – зміни струму заряду/розряду паразитного конденсатора, V(n004) – графік напруги на вузлі інжекції, I(R2) – графік струму через постійну складову опору замикання на землю

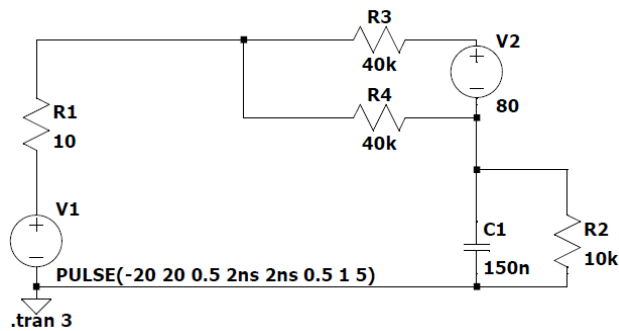


Рисунок 8 – Схема симуляції методу низькочастотної інжекції (з замиканням на землю)

**Вдосконалення та особливості практичної реалізації систем контролю ізоляції ротора синхронного генератора.** Дослідження, виконані для генераторів малої та середньої потужності (1,5–12 МВт), показують, що зміни стану ізоляції суттєво залежать від експлуатаційних факторів, таких як вологість, температура, стан контактних кілець та щіткового апарату, а також рівня електромагнітних завад від статичних систем збудження.

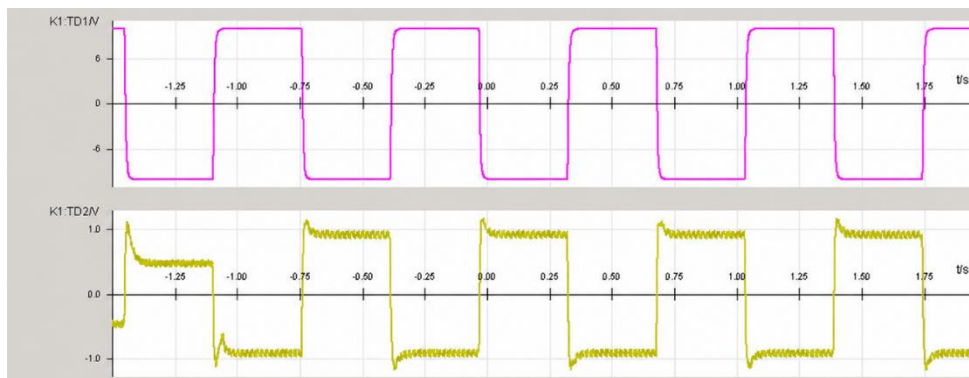
Практична реалізація систем контролю ізоляції ротора синхронного генератора із застосуванням методу інжекції низькочастотної напруги потребує врахування електричних параметрів конкретної машини, насамперед паразитної ємності обмотки ротора відносно землі. Саме ємнісні характеристики ротора визначають динаміку перехідних процесів під

час інжекції тестового сигналу та безпосередньо впливають на точність визначення опору ізоляції. Це підтверджує необхідність адаптивних алгоритмів, які неможливо реалізувати в застарілих електромеханічних системах.

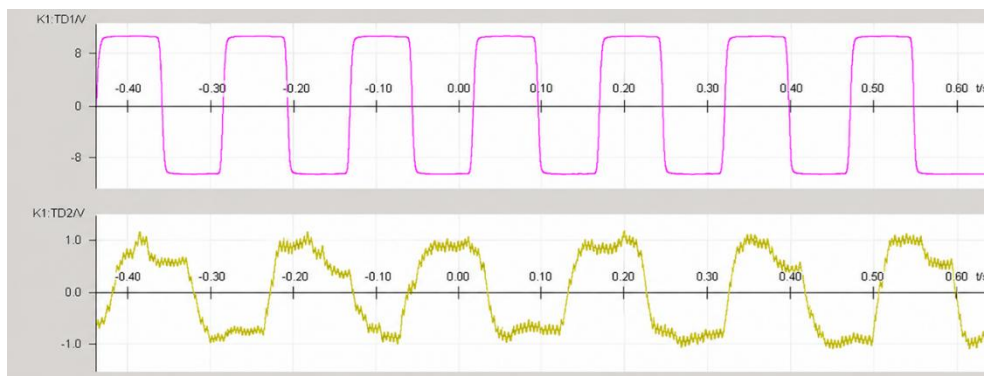
З метою дослідження впливу частоти інжекції на інформативність сигналу та точність вимірювання було проведено експериментальні дослідження на турбогенераторі типу Т-12-2У3 потужністю 12 МВт. У процесі досліджень здійснювалась інжекція низькочастотної імпульсної напруги з частотами від 0,5 до 4 Гц із подальшим аналізом форми струму витoku та характеру перехідних процесів (рис. 9).

Результати експерименту показали, що зі збільшенням частоти інжекції суттєво зростає вплив паразитної ємності ротора, внаслідок чого перехідні процеси не встигають завершитися до моменту подачі наступного імпульсу. Це призводить до зменшення інформативності сигналу та появи додаткової похибки під час визначення опору ізоляції ротора.

Встановлено, що для досліджуваного турбогенератора найбільш інформативною виявилась частота інжекції 0,5 Гц. За даної частоти забезпечується практично повне завершення процесів заряджання та розряджання паразитної ємності ротора між імпульсами, що дає змогу отримати стабільніший та достовірніший вимірюваний сигнал. За частот 2–4 Гц спостерігалось погіршення перехідних характеристик та збільшення впливу ємнісної складової на результати вимірювання.



б) частота інжектваної напруги – 0,5 Гц



б) частота інжектваної напруги – 3 Гц

Рисунок 9 – Осцилограми інжекції низькочастотної напруги та струму замикання на землю ротора генератора

З урахуванням проведеного аналізу та моделювання доцільною є реалізація спеціалізованого мікропроцесорного реле контролю ізоляції ротора, структурна схема якого наведена на рис. 10.

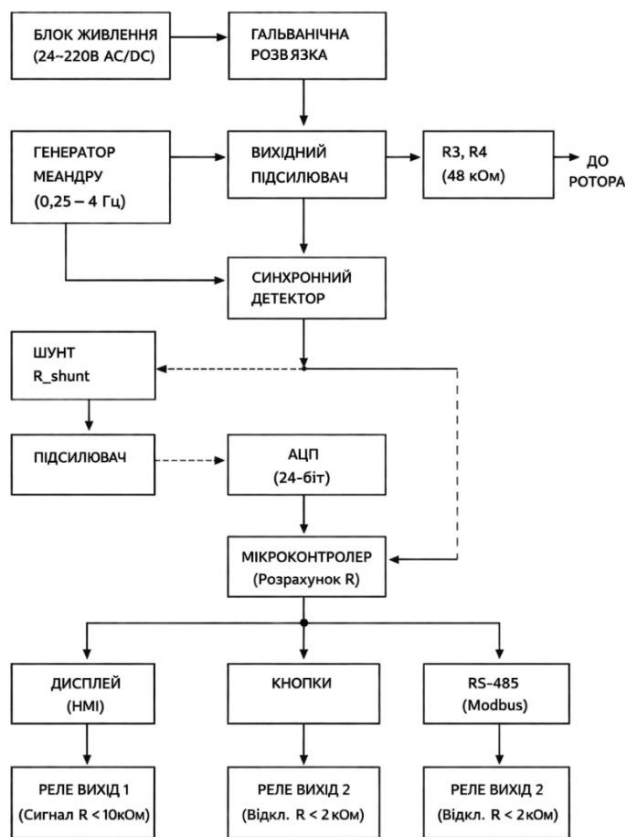


Рисунок 10 – Структурна схема пристрою контролю ізоляції ротора генератора

Запропонована структура включає блок живлення з широким діапазоном вхідної напруги (24–220 В АС/DC), гальванічну розв'язку для забезпечення електробезпеки та завадостійкості, генератор низькочастотного меандру (0,25–4 Гц), який формує інжектований сигнал, частота якого може змінюватись залежно від значення паразитної ємності обмотки ротора відносно землі, а також вихідний підсилювач, що подає його в коло ротора через високоомні резистори. Вимірювання струму витoku здійснюється за допомогою шунта з подальшим підсиленням сигналу та перетворенням у цифрову форму за допомогою високорозрядного (24-бітного) аналогово-цифрового перетворювача. Синхронний детектор дає змогу виділити корисну складову струму, синхронізовану з інжектованим сигналом, що значно підвищує завадостійкість системи.

Центральним елементом є мікроконтролер або цифровий сигнальний процесор, який виконує розрахунок опору ізоляції, аналіз трендів та формує керуючі сигнали. Інтерфейс користувача реалізується через дисплей та кнопки, а для інтегрування в системи автоматизації передбачено інтерфейс зв'язку RS-485 (Modbus). Вихідні реле забезпечують двоступеневий захист: сигналізацію у разі зниження опору ізоляції

(нижче 10 кОм) та аварійне відключення у разі критичного значення (нижче 2 кОм).

Особливу роль у підвищенні ефективності системи відіграє обробка результатів вимірювань. На відміну від традиційних підходів, що базуються лише на порогових значеннях, доцільно використовувати комплексний аналіз сигналів, який включає синхронне вимірювання струмів у кожному напівперіоді інжекції, цифрову фільтрацію для придушення шумів, а також обчислення осереднених та диференціальних параметрів. Важливим є аналіз зміни опору ізоляції у часі, що дає змогу виявляти деградацію ізоляції задовго до виникнення аварійного замикання. Такий підхід фактично переводить систему із класу релейного захисту в клас систем діагностики стану.

Подальшим кроком розвитку є застосування методів машинного навчання для аналізу отриманих даних. На основі таких параметрів, як струм витoku, форма сигналу, параметри перехідного процесу та швидкість зміни опору ізоляції, можуть бути реалізовані алгоритми класифікації стану ротора (нормальний режим, деградація ізоляції, замикання), виявлення аномалій та прогнозування відмов. Використання моделей типу Random Forest, Support Vector Machines або нейронних мереж для аналізу часових рядів дасть змогу виявляти приховані закономірності, які не визначаються класичними методами. Це відкриє можливість реалізації концепції «predictive maintenance», що є особливо актуальною для енергетичних об'єктів, де простої обладнання пов'язані зі значними економічними втратами.

Таким чином, поєднання методу інжекції низькочастотної напруги прямокутної форми, сучасної мікропроцесорної апаратної реалізації, розширеної цифрової обробки сигналів та алгоритмів штучного інтелекту дозволить створити ефективну систему нового покоління для контролю ізоляції ротора синхронного генератора, яка забезпечить не лише надійне виявлення замикань на землю, а й їх прогнозування, що суттєво підвищить надійність та економічність експлуатації електроенергетичного обладнання.

**Висновки.** Проведений аналіз сучасних методів контролю ізоляції обмотки ротора синхронного генератора показав, що традиційні схеми захисту мають обмежену чутливість та недостатню завадостійкість в умовах роботи сучасних статичних систем збудження, особливо за наявності паразитних ємностей і гармонічних складових. Встановлено, що найбільш ефективним підходом є метод низькочастотної інжекції напруги прямокутної форми, який забезпечує надійне виявлення замикань на землю незалежно від місця виникнення, характеризується високою стійкістю до впливу гармонік та дає змогу точніше визначити опір ізоляції обмотки ротора.

Результати моделювання в середовищі LTspice підтвердили, що за відсутності замикання на землю в усталеному режимі струм витoku практично відсутній,

а за появи замикання формується стабільна ненульова складова струму, що забезпечує чітке розділення нормального та аварійного режимів роботи для системи контролю ізоляції ротора генератора.

Експериментальні дослідження на турбогенераторі Т-12-2УЗ потужністю 12 МВт показали суттєвий вплив паразитної ємності ротора на характер перехідних процесів та інформативність вимірювального сигналу. Встановлено, що зі збільшенням частоти інжекції зростає вплив ємнісної складової та погіршується точність визначення опору ізоляції через незавершеність процесів заряджання та розряджання паразитної ємності між імпульсами. Для досліджуваного генератора найбільш інформативною виявилась інжекція напруги частотою 0,5 Гц, за якої формується стабільний вимірювальний сигнал.

Таким чином, за результатами теоретичних досліджень та натурних експериментів встановлено залежність точності оцінювання опору ізоляції ротора синхронного генератора від частоти інжектваної напруги, а отже показано необхідність її адаптивного вибору залежно від параметрів генератора, зокрема, від значення паразитної ємності його ротора відносно землі.

На підставі проведеного аналізу, моделювання та експериментальних досліджень показано доцільність створення спеціалізованого мікропроцесорного пристрою контролю ізоляції ротора з адаптивною зміною частоти інжектваної напруги, цифровою обробкою сигналів та синхронним детектуванням. Запропоновано структурну схему такого пристрою.

Застосування розширених алгоритмів аналізу сигналів і методів машинного навчання дасть можливість переходу від традиційного релейного захисту до системи безперервної діагностики та прогнозування стану ізоляції ротора синхронного генератора, що дозволить підвищити надійність і економічність експлуатації електроенергетичного обладнання.

### Список літератури

1. Anderson P. M. Power system protection. IEEE, 1998. 1330 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/9780470545591>.
2. IEEE Power System Relaying Committee (PSRC). IEEE tutorial on the protection of synchronous generators. 2nd ed. 2011. 113 p. URL: <https://www.pes-psrc.org/kb/report/026.pdf>.
3. A novel rotor ground-fault-detection technique for synchronous machines with static excitation / C. A. P. Gaona et al. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2010. Vol. 25, no. 4. P. 965–973. DOI: <https://doi.org/10.1109/tec.2010.2040739>.
4. Detection of rotor faults in synchronous generators / M. Kiani et al. *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Cracow, Poland, 6–8 September 2007. 2007. P. 266–271. DOI: <https://doi.org/10.1109/demped.2007.4393106>.
5. Eleschová Z., Belan A., Gasparovsky D. Rotor ground fault protection of generator with static excitation system. *Teoretychna*

*elektrotehnika*. 2005. No. 58. P. 138–146. URL: [https://www.researchgate.net/publication/239596282\\_ROTOR\\_GROUND\\_FAULT\\_PROTECTION\\_OF\\_GENERATOR\\_WITH\\_STATIC\\_EXCITATION\\_SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/239596282_ROTOR_GROUND_FAULT_PROTECTION_OF_GENERATOR_WITH_STATIC_EXCITATION_SYSTEM).

6. Siemens. SIPROTEC 4 voltage and frequency protection 7RW80. 2018. URL: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/624/109742624/att\\_959437/v1/7RW80\\_Manual\\_A4\\_V040300\\_us.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/624/109742624/att_959437/v1/7RW80_Manual_A4_V040300_us.pdf).
7. Mozina C. J., Yalla M. V. V. S. Fundamental reliability considerations in the design, manufacturing and application of multifunction digital relays for generator protection. 1996. 11 p.
8. C37.101-1993. IEEE guide for generator ground protection. Official edition. IEEE, 1994. 59 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1994.121443>.
9. IEEE Power Engineering Society. IEEE tutorial on the protection of synchronous generators. IEEE, 1995. 78 p.
10. MiCOM p34x, IEC 61850 PICS & MICS & PIXIT & TICS & ADL. *Schneider Electric*. URL: [https://www.se.com/uk/en/download/document/P34x\\_EN\\_Rf7\\_B5\\_1EC61850/](https://www.se.com/uk/en/download/document/P34x_EN_Rf7_B5_1EC61850/).

### References

1. P. M. Anderson, *Power System Protection*. IEEE, 1998, doi: <https://doi.org/10.1109/9780470545591>
2. IEEE Power System Relaying Committee (PSRC), *IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators*, 2nd ed. 2011. [Online]. Available: <https://www.pes-psrc.org/kb/report/026.pdf>
3. C. A. P. Gaona, F. Blázquez, P. Frías, and M. Redondo, “A novel rotor ground-fault-detection technique for synchronous machines with static excitation,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 4, pp. 965–973, Dec. 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/tec.2010.2040739>
4. M. Kiani, J. Lee, R. Kenarangi, and B. Fahimi, “Detection of rotor faults in synchronous generators,” in *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Cracow, Poland, Sep. 6–8, 2007. IEEE, 2007, pp. 266–271, doi: <https://doi.org/10.1109/demped.2007.4393106>
5. Z. Eleschová, A. Belan, and D. Gasparovsky, “Rotor ground fault protection of generator with static excitation system,” *Electrical Engineering*, no. 58, pp. 138–146, 2005. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/239596282\\_ROTOR\\_GROUND\\_FAULT\\_PROTECTION\\_OF\\_GENERATOR\\_WITH\\_STATIC\\_EXCITATION\\_SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/239596282_ROTOR_GROUND_FAULT_PROTECTION_OF_GENERATOR_WITH_STATIC_EXCITATION_SYSTEM)
6. Siemens, “SIPROTEC 4 voltage and frequency protection 7RW80,” C53000-G1140-C233-4, 2018. [Online]. Available: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/624/109742624/att\\_959437/v1/7RW80\\_Manual\\_A4\\_V040300\\_us.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/624/109742624/att_959437/v1/7RW80_Manual_A4_V040300_us.pdf)
7. C. J. Mozina and M. V. V. S. Yalla, “Fundamental reliability considerations in the design, manufacturing and application of multifunction digital relays for generator protection,” CONF-9604158, Aug. 1996.
8. *IEEE Guide for Generator Ground Protection*, 1993, IEEE, 1994, doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1994.121443>
9. IEEE Power Engineering Society, “IEEE tutorial on the protection of synchronous generators,” IEEE, 95 TP 102, 1995.
10. “MiCOM p34x, IEC 61850 PICS & MICS & PIXIT & TICS & ADL.” *Schneider Electric*. [Online]. Available: [https://www.se.com/uk/en/download/document/P34x\\_EN\\_Rf7\\_B5\\_1EC61850/](https://www.se.com/uk/en/download/document/P34x_EN_Rf7_B5_1EC61850/)

Надійшла (Received) 03.04.2026

Прийнята (Accepted) 14.05.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

UDC 621.311.183

**ANDRUSHKO STANISLAV** ✉ – Postgraduate student of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Chief Engineer of Podillyatechnaladka LLC; Vinnytsia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7846-517X>; e-mail: [stanislav.andrushko@gmail.com](mailto:stanislav.andrushko@gmail.com).

**KULYK VOLODYMYR** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University; Vinnytsia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7594-5661>; e-mail: [volodymyrvkulyk@gmail.com](mailto:volodymyrvkulyk@gmail.com).

### **IMPROVEMENT OF THE ROTOR WINDING PROTECTION SYSTEM FOR SMALL- AND MEDIUM-POWER SYNCHRONOUS GENERATORS AGAINST GROUND FAULTS BASED ON A SQUARE WAVE INJECTION METHOD**

The article is devoted to a comprehensive analysis of modern methods of protecting the excitation winding of a synchronous generator rotor from ground faults and justification of ways to improve them, taking into account the actual operating conditions in the power systems of Ukraine. Particular attention is paid to the problem of timely detection of the first ground fault, since it creates the preconditions for an emergency second fault, accompanied by high currents, thermal overloads, mechanical damage to the rotor, bearings, and active parts of the generator. The relevance of the topic is due to the frequent deterioration of the condition of the insulation of rotor windings in small and medium-power synchronous generators (1.5–12 MW), which leads to prolonged emergency shutdowns, expensive repairs, and significant economic losses. The significant shortcomings of traditional electromechanical protection devices, which are still in use at many power plants, are analyzed. Three main modern principles of continuous online monitoring of excitation circuit insulation are considered in detail. For each method, the physical principles of operation, main advantages (noise immunity to harmonics of static excitation systems, independence from the location of damage, elimination of the polarization effect due to periodic polarity reversal, the ability to accurately calculate insulation resistance) and characteristic limitations (the need for external injection and communication units, the need for periodic calibration, the relative complexity of installation and integration into existing relay protection systems) are described for each method. To verify the theoretical propositions and illustrate the behavior of the most modern method (meander injection), transient modeling was performed in the LTspice environment. Based on the analysis and modeling, the feasibility of developing a separate specialized microprocessor-based rotor insulation control relay, independent of multifunctional generator protection terminals, was justified.

**Keywords:** ground fault; synchronous generator; insulation monitoring relay; AC-injection method; DC-injection method; square wave voltage injection method; excitation; leakage current; parasitic capacitance.