

УДК 621.313.322

**В.М. КУТІН** (д-р техн. наук, проф.), **О.О. ШПАЧУК**  
**Державний вищий навчальний заклад**  
**«Вінницький національний технічний університет»**  
**[gramozeko89@mail.ru](mailto:gramozeko89@mail.ru)**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ПРОЦЕСІ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

*В роботі розглянуто основні фактори та процеси, що впливають на зміну технічного стану ізоляції обмотки статора синхронного генератора відносно землі в процесі його експлуатації. Запропоновано в якості показника якості функціонування ізоляції обмотки статора синхронного генератора використовувати значення струму витоку на землю.*

**Ключові слова:** синхронний генератор, обмотка статора, технічний стан ізоляції.

**Постановка проблеми.** Сучасні засоби діагностування та релейного захисту повинні забезпечувати можливість раннього виявлення пошкоджень, та не допускати виходу основного обладнання електростанцій з ладу. Вихід з ладу в наслідок пошкодження потужних гідро- та турбогенераторів в умовах малого резерву потужності енергосистеми спричиняє виникнення лавини частоти і розвитку системної аварії, що в свою чергу потягне за собою значні матеріальні збитки. Саме тому актуальною є задача розробки нових і вдосконалення вже існуючих засобів діагностування і релейного захисту потужних гідро- та турбогенераторів. Для розробки нових пристроїв діагностування і захисту необхідно виявити причини виникнення найбільш поширених видів ушкоджень.

**Аналіз попередніх досліджень та публікацій.** В роботах [1-3] розглядаються особливості конструкції та технології виготовлення ізоляції обмотки статора синхронних генераторів (СГ) різних типів та основні причини виникнення пошкоджень ізоляції. В роботі [4] розглядаються аномальні та аварійні роботи режими потужних турбогенераторів. Робота [5] присвячена електроізоляційним матеріалам та процесам, що протікають в них під дією різноманітних факторів зовнішнього середовища.

**Мета роботи.** Підвищення чутливості захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора СГ шляхом виявлення факторів, що впливають на технічний стан ізоляції обмотки статора.

**Матеріали дослідження.** Основні пошкодження потужних СГ, такі як двофазні та трифазні короткі замикання, однофазні замикання на землю обмотки статора СГ, однополюсні та двополюсні замикання в колі збудження виникають внаслідок втрати ізоляцією своїх властивостей. Тому в основі побудови системи діагностування чи релейного захисту СГ повинен лежати контроль технічного стану ізоляції машини. Технічним станом ізоляції статора СГ будемо називати сукупність властивостей ізоляції, які можуть змінюватися в процесі експлуатації під дією зовнішніх факторів і визначаються в певний момент часу, за певних умов зовнішнього середовища певними значеннями діагностичних показників відповідно до норм.

Розглянемо конструкцію ізоляції потужних СГ. Загалом для виготовлення ізоляції обмотки статора турбо- та гідрогенераторів використовуються однакові матеріали і технологія виготовлення ізоляції є аналогічними. Для ізоляції обмотки статора використовують терморективну або термопластичні ізоляції. Терморективна ізоляція широко використовувалась до 60-х років минулого століття, наразі вона застосовується лише для машин потужністю до 60 МВт. Терморективна ізоляція виготовляється з двох шарів паперової стрічки між якими вкладається шар слюдяної стрічки, що скріплюється з паперовою основою асфальтобітумним лаком. В якості компаунду для такої ізоляції використовувався асфальт з додаванням лляної оливи і каніфолі. Вартість такої ізоляції складає до 40% від вартості матеріалів генератора, крім того така ізоляція має досить серйозний недолік – вона має властивість розм'якшуватися при підвищенні температури.

Для ізоляції обмотки статора більш сучасних та потужних машин використовується терморективна ізоляція типу «Слюдотерм» (використовується для ізоляції стержнів обмотки статора турбогенераторів типу ТВВ), ВЭС-2 (використовується на генераторах типу ТГВ), «Монолит». Ізоляції типу «Слюдотерм» та ВЭС-2 відрізняються тільки тим, що у ВЭС-2 використовується інший тип слюдинітової стрічки і зв'язуюча речовина на основі епоксидного поліефірного компаунду. До складу ізоляції також входять внутрішні електростатичні екрани з алюмінієвої фольги і використовуються прокладки з напівпровідного і звичайного склотекстоліту. Ізоляція «Монолит» відрізняється від інших підвищеною стійкістю до зволоження, вібрації, ударних навантажень, появи корони а також вищою електричною міцністю. [1,2]

Розглянемо фактори, що впливають на умови роботи ізоляції СГ. Схематично вплив різного роду факторів на ізоляцію обмотки статора СГ показано на рис. 1. Загалом можна виділити такі групи факторів впливу: недоліки конструктивного виконання та технології виготовлення, недоліки монтажу, вплив якості технічного обслуговування та ремонтів, вплив режиму навантажень та аномальних режимів. В загальному випадку не можна виділити найбільш небезпечні фактори, оскільки будь-яке пошкодження виникає та розвивається внаслідок сукупної дії усіх груп факторів.

До кріплення обмотки статора СТ висуваються високі вимоги щодо здатності витримувати потужні вібраційні навантаження. Проте не завжди кріплення відповідає високим поставленим вимогам. Невдала конструкція кріплення може призводити до розтріскування міді обмотки і пошкодження корпусної ізоляції стержнів. Тріщини в провідниках обмотки статора генераторів з прямим охолодженням обмотки призводить до появи витoku охолоджувача (водню чи води), що призводить до зволоження ізоляції.

При зростанні потужності агрегатів значно зростають і електродинамічні зусилля, що пульсують з подвійною частотою і викликають вібрацію стержнів обмотки статора.

В особливо складних умовах знаходиться лобова частина обмотки статора. Електродинамічні зусилля в даній частині обмотки мають радіальну і тангенціальну складові, на величину і напрям дії яких значно впливають такі чинники як взаємодія струмів поля статора і поля ротора, близьке розташування нажимних плит, крайніх пакетів осердя статора, зовнішніх щитів валу та бандажних кілець ротора. В наслідок дії сил, що вказані раніше лобова частина обмотки закручується в протилежному напрямку відносно обертання ротора.

На вібрацію стержнів впливають зусилля тертя стержнів об бокові стінки пазу. Ці зусилля залежать від тангенціальних зазорів між стержнями і стінками пазу, як наслідок, від допусків на вкладання по ширині пазу. Про обмежуючий вплив бічного тертя на радіальну вібрацію стержнів в пазах говорить і те, що для стержнів з терморезистивною ізоляцією вібрація виявилася вищою ніж для стержнів з мікастрічковою компаундовою ізоляцією, оскільки компаундована ізоляція розширюється при нагріванні в процесі експлуатації і обмотки з такою ізоляцією, як правило щільно прилягають до бокових стінок пазів, в наслідок чого виникають значні сили тертя.

Переміщуючись поверхнею лобових дуг деталі кріплення руйнують корпусну ізоляцію, а в деяких випадках протирають отвори у стінках порожнистих провідників стержнів. Якщо пошкодження корпусної ізоляції знаходиться поблизу виходу обмотки з пазів, то можливим є перекриття на осердя і спрацювання захисту від замикання на «землю», після чого необхідна часткова перемотка статора з заміною одного чи кількох стержнів. Розташування місць ослаблення корпусної ізоляції у між фазній зоні може призводити до між фазних коротких замикань і спрацювання відповідного захисту. Це, зазвичай, супроводжується значним об'ємом пошкоджень статора, що вимагають перемотки чи заміни статора.

Прогресуюче ослаблення пазових клинів внаслідок вібрацій призводить до виповзання крайніх клинів з пазів і подальшого ослаблення кріплення обмотки в пазу, внаслідок чого можуть виникати тріщини та злами елементарних провідників.

Якщо тріщина виникла в порожнистому провіднику, то це виявляється за появою водню в газовій пастці, тобто за зростання концентрації водню у дистилаті. В зоні тріщини з'являється іскріння, контакт струмоведучого кола провідника погіршується, що призводить до значного місцевого нагрівання і наступного пошкодження корпусної ізоляції, аж до пробоя на землю. Якщо описане вище явище було виявлене на статорі при першому ремонті з вийманням ротора, то вони свідчать про низьку якість виготовлення статора, наприклад, про порушення технології запікання чи неправильне вкладання стержнів. Після більш тривалої експлуатації ознаки підвищення вібрації обмотки можуть свідчити про неякісний ремонт обмотки, якщо такий ремонт проводився, чи про ударні впливи на обмотку – близькі короткі замикання, часті форсування збудження. [3]

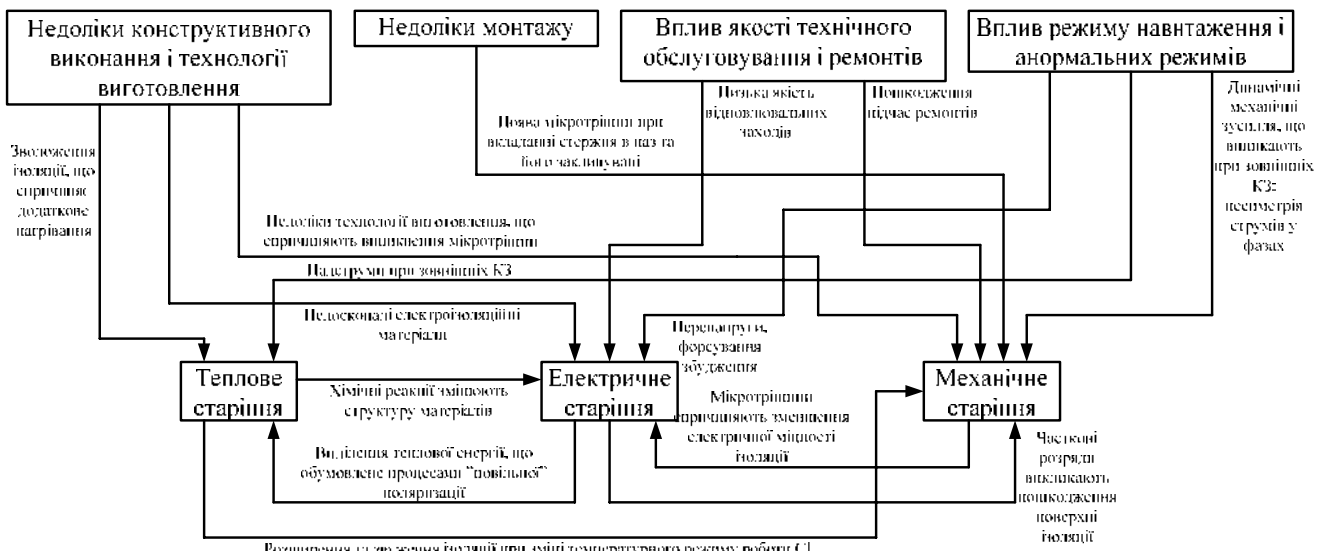


Рисунок 1 – Вплив різного роду факторів на ізоляцію обмотки статора СТ.

На роботу ізоляції значно впливають режими роботи генератора. Турбогенератори потужністю 110 МВт і більше можуть перевантажуватись на 10 % і працювати в цьому режимі тривалий час.

Несиметрія струмів в фазах статора створює знакозмінний момент, що створює механічну дію на елементи генератора.

У випадках, коли генератор працює з напругою нижчою за номінальну обмотка статора може перевантажуватись і ізоляція обмотки може додатково нагріватися. В свою чергу збільшення напруги призводить до збільшення індукції магнітного поля генератора, що у свою чергу призводить до насичення і додаткового нагріву сталі статора. А це в свою чергу відображається на температурному режимі ізоляції обмотки статора.

При зменшенні магнітного потоку, що створюється струмом збудження, генератор починає споживати на намагнічування реактивну потужність з мережі. При цьому зростає струм статора, що може викликати перевантаження його обмотки, а напруга мережі через порушення балансу реактивної потужності зменшується [4].

За тривалої роботи генератора з коефіцієнтом потужності, що близький до одиниці, зростає аксіальна складова індукції, що діє на лобову частину осердя. В таких умовах зростає нагрів лобової зони осердя і знакозмінні електродинамічні сили, які викликаючи вібрації листів крайніх пакетів, створюють умови для виникнення пошкоджень осердя та обмотки.

Розглянуті вище фактори є зовнішніми по відношенню до ізоляції обмотки статора. Зараз варто також звернути увагу на ті процеси, що відбуваються в ізоляції обмотки статора СГ. В процесі експлуатації відбувається поступове зміна технічного стану (старіння) ізоляції. В цьому процесі можна виділити три основних складових: електричну, теплову та механічну. Теплове старіння ізоляції виникає та розвивається вже за робочих температур електроустановок (90 – 180°C). За таких температур в ізоляції виникають чи різко прискорюються хімічні реакції, які змінюють структуру матеріалів і викликають погіршення властивостей всієї ізоляції. Строк служби за теплового старіння ізоляції зворотно пропорційний до швидкості хімічних реакцій, що протікають в ізоляції. Зміна теплового режиму роботи ізоляції впливає також на механічну міцність ізоляції. Процес механічного старіння ізоляції полягає у поступовому виникненні і збільшенні мікротріщин в ізоляції під дією статичних та динамічних механічних зусиль які виникають підчас експлуатації. Наявність тріщин суттєво зменшує електричну міцність діелектрика. Електричне старіння ізоляції відбувається при напруженості електричного поля, що в 5 – 20 разів менші за пробивну напругу. На процес електричного старіння ізоляції значно впливають такі види «повільної» поляризації як електронно-релаксаційна, міграційна та спонтанна.

З зазначеної вище схеми можна виділити такі основні фактори, що впливають на технічний стан ізоляції: температура ізоляції  $T$ , напруга прикладена до ізоляції  $U$ , амплітуда вібропереміщення  $x_m$  та час вібрації  $t_x$ . Зазначені вище фактори в цілому впливають на один параметр ізоляції - питому провідність ізоляції  $\gamma$ . Визначивши якою мірою вказані вище фактори впливають на значення параметру  $\gamma$  та отримавши аналітичні залежності питомої провідності від температури

$$\gamma = \gamma_0 \cdot 2^{\frac{T-T_0}{\Delta T}},$$

де  $\gamma$  – питомий опір при температурі  $T$ ;  $\gamma_0$  – питома провідність при температурі  $T_0$ ;  $\Delta T$  – коефіцієнт, значення якого змінюється від 10 до 18°C; питомої провідності від напруженості електричного поля:

$$\gamma_E = \gamma \cdot e^{\beta E},$$

де  $E$  – напруженість поля;  $\gamma$  – питома провідність в області де  $\gamma$  не залежить від  $E$ ;  $\beta$  – коефіцієнт, що характеризує матеріал [5]; а також  $\gamma = f(x_m)$ ,  $\gamma = f(t_x)$  можна отримати деяку залежність  $\gamma = f(\gamma_0, \Delta T, \Delta U, \Delta x_m, t_x)$ .

Зазначений вище вираз  $\gamma = f(\gamma_0, \Delta T, \Delta U, \Delta x_m, \Delta t_x)$  в свою чергу є складним для використання його у системах діагностування чи релейного захисту. Тому виникатиме необхідність переходу від параметру  $\gamma$  до параметру  $R_{is}$  – опору ізоляції обмотки статора СГ. Отримана залежність  $R_{is} = f(\gamma_0, \Delta T, \Delta U, \Delta x_m, t_x)$  дасть змогу синтезувати на її основі систему діагностування технічного стану ізоляції обмотки статора СГ та прогнозування часу служби ізоляції  $\tau$ , яка враховуватиме у процесі прогнозування не тільки електричні параметри ізоляції, а й вплив на них інших факторів зовнішнього середовища.

Для засобів діагностування та релейного захисту ізоляції обмотки статора контроль параметру  $\gamma$  чи опір ізоляції  $R_{is}$ , або контроль впливу на данні параметри факторів, що описані вище є надзвичайно складною задачею з декількох причин: по-перше відхилення  $\Delta T$ ,  $\Delta U$ ,  $\Delta x_m$  залежать від режиму роботи генератора, його навантаження, що є випадковою величиною, тому важко отримати чітку залежність опору ізоляції від усіх параметрів і встановити долю впливу кожного фактору; по-друге – для контролю впливу  $T$ ,  $U$ ,  $x_m$ ,  $t_x$  необхідно побудувати розгалужену складну мережу сенсорів відповідних параметрів; по-третє – ще однією суттєвою проблемою такої складної системи діагностування є розробка і функціонування алгоритму обробки великих масивів інформації та забезпечення єдності вимірювань. Структурна схема такої системи діагностування представлена на рисунку 2 а.

З викладених вище суджень випливає, що для побудови більш простої системи діагностування чи релейного захисту необхідно перейти від контролю параметрів  $R_{is}$ ,  $T$ ,  $U$ ,  $x_m$ ,  $t_x$  до контролю деякого одного інтегрального показника, який би відображав електричний, температурний та вібраційний режими роботи ізоляції обмотки статора СГ. Таким показником може слугувати енергія або потужність, яка розсіюється в ізоляції обмотки статора. Залежність потужності, що розсіюється в ізоляції обмотки статора, від параметрів ізоляції та прикладеної напруги має вигляд:

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

де  $U$  – напруга, що прикладена до ізоляції;  $\omega$  – циклічна частота;  $C$  – ємність ізоляції при паралельній схемі заміщення;  $\text{tg}\delta$  – тангенс кута діелектричних втрат.

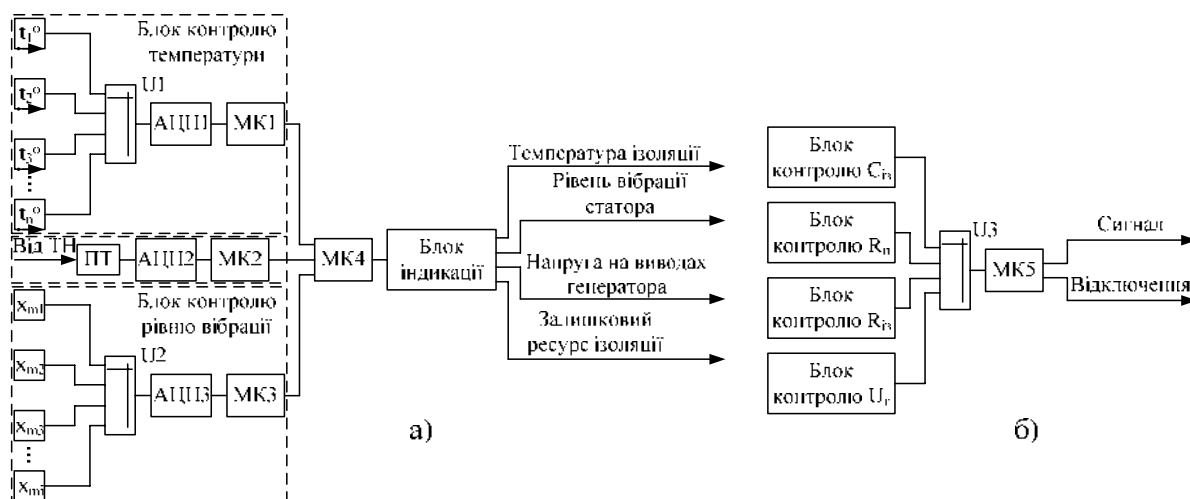


Рисунок 2 – Структурна схема пристрою діагностування ізоляції обмотки статора СГ (а) та захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора СГ (б).

В свою чергу такий показник не є інформативним. До того ж значення енергії, що розсіюється в ізоляції обмотки статора ніяким чином не нормується в документах. З іншого боку, подібним показником може виступити величина струму витoku через ізоляцію обмотки статора СГ. Контроль величини струму витoku через ізоляцію не може здійснюватися безпосередньо, але значення відповідної величини можна отримати опосередковано, контролюючи такі параметри ізоляції обмотки статора СГ як активний опір та ємність ізоляції, перехідний опір в місці замикання на землю  $R_n$  а також напругу, що прикладається до ізоляції.

**Висновки.** В процесі експлуатації ізоляція обмотки статора потужних СГ зазнає впливу великої кількості факторів, що погіршують її електроізоляційні властивості. На якість роботи ізоляції впливають, як технології виготовлення, монтаж та обслуговування ізоляції, так і процеси, що протікають в електроізоляційних матеріалах а також режими роботи СГ. Побудова системи діагностування технічного стану ізоляції обмотки статора СГ, яка б враховувала вплив вище вказаних факторів є надзвичайно складною задачею у зв'язку зі складністю побудови підсистеми збору інформації та її високою вартістю.

Пропонується для цілей релейного захисту обмотки статора СГ від однофазних замикань на землю, що працює в блоці з трансформатором, та діагностування технічного стану ізоляції обмотки статора СГ використовувати інтегральний показник, а саме – величину струму витoku через ізоляцію обмотки статора СГ  $I=f(U; R_{i3}; R_n; C)$ . Запропонований показник характеризуватиме як режим роботи генератора так і стан основних параметрів ізоляції обмотки статора (активний опір ізоляції обмотки статора та ємність ізоляції обмотки статора відносно землі).

Використовуючи запропонований показник можна побудувати систему, що поєднає в собі функції пристрою діагностування та пристрою релейного захисту (рис.2,б). Такий захист можна виконати двоступеневим. Перша ступінь захисту спрацюватиме на сигнал при поступовому симетричному зниженні рівня ізоляції нижче встановленого значення, а друга при виникненні раптового замикання на землю.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Домбровский В.В. Гидрогенераторы / В.В. Домбровский, А.А. Дукштау, Г.Б. Пинский – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 366 с.
2. Извеков В.И. Проектирование турбогенераторов / В.И. Извеков, Н.А. Серихин, А.И. Абрамов – М.: МЭИ – 2005. – 440 с.
3. Голоднова О.С. Основные причины отказов турбогенераторов и пути их предупреждения / О.С. Голоднова – М.: ИПК-госслужбы – 2005. – 93 с.
4. Коган Ф. Л. Аномальные режимы мощных турбогенераторов / Ф. Л. Коган. – М.: Энергоатомиздат – 1988. – 191 с.
5. Серебряков А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: [учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта] / А. С. Серебряков – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.

#### REFERENCES

1. Dombrowski V. V., Dukshtau A.A., Pinsky G.B. *Gidrogenatory* [Hydraulic generators]. Leningrad: Energoatomizdat, 1982. 366 p.
2. Izvekov V.I., Serihin N.A., Abramov A.I. *Proyektirovaniye turbogeneratorov* [Designing turbogenerators]. Moscow: MEI, 2005. 440 p.

3. Golodnova O.S. *Osnovnyye prichiny otkazov turbogeneratorov i puti ikh preduprezhdeniya* [The primary reason of failure turbine generators and ways to prevent]. Moscow: ИПК-gossulzhby, 2005. 93 p.

4. Kogan F.L. *Anormalnyye rezhimy moshchnykh turbogeneratorov* [Abnormal modes of powerful turbogenerators]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 191 p.

5. Serebryakov A.S. *Elektrotekhnicheskoye materialovedeniye. Elektroizolyatsionnyye materialy* [Electrical Materials. Electrical insulating materials: manual]. Moscow: Marshrut, 2005. 280 p.

Надійшла до редакції 25.03.2013

Рецензент: М.В.Гребченко

В. М. КУТИН, А. А. ШПАЧУК

Государственное высшее учебное заведение «Винницкий национальный технический университет»

**Исследование технического состояния изоляции обмотки статора синхронного генератора в процессе его эксплуатации.** В работе рассмотрены основные факторы и процессы, влияющие на изменение технического состояния изоляции обмотки статора синхронного генератора в процессе его эксплуатации. Предложено в качестве показателя качества функционирования изоляции обмотки статора синхронного генератора использовать значение тока утечки на землю.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, обмотка статора, техническое состояние изоляции.

V. KUTIN, A. SHPACHUK

State Institution of Higher Education «Vinnitsa National Technical University»

**Investigation of the Technical Condition of Stator Winding Insulation of the Synchronous Generator During Its Operation.** Modern methods of diagnosing and relaying should allow early detection of damage, and to prevent the release of main equipment of power stations down. Failure as a result of injuries powerful hydro and turbogenerators in a small reserve of power grid is able to cause an avalanche of frequency of system failure, which in turn entail considerable material losses. It is therefore urgent task is to develop new and improve existing means of diagnosing and relaying powerful hydro and turbogenerators. For the development of new devices for diagnostics and protection necessary to identify the causes of the most common types of injuries. In the operation of the stator winding insulation powerful synchronous generator affected a large number of factors that impair its electrical properties. The quality of the insulation effect, as technology manufacturing, installation and maintenance of isolation, and processes in insulating materials and modes of synchronous generator. Construction of diagnosing the technical condition of the stator winding insulation synchronous generator, which would take into account the impact of the above factors are extremely difficult task due to the complexity of building subsystems collection and its high cost. Proposed for the purpose of relaying the stator winding synchronous generator, working in alliance with transformer, from single-phase earth fault and diagnosing the technical condition of the stator winding insulation synchronous generator use integral index - namely, the amount of current leakage through the insulation of the stator winding synchronous generator  $I = f(U; R_{sw}; R_t; C)$ . The indexes characterize as the generator mode and state of the main parameters of the stator winding insulation (insulation resistance of the stator winding  $R_{sw}$ , stator winding insulation capacity relative to the ground  $C$  and transitional resistance in place of earth fault  $R_t$ ). Using the proposed indicator can build systems that combine the functions of the device diagnostics and device relaying. Such protection can perform two-stage. The first level of protection will work on symmetric signal with a gradual decrease in the level of insulation below the set value, and the other in the event of sudden ground fault.

**Keywords:** synchronous generator, stator winding, technical condition of insulation.