

В. М. Кутін¹
О. О. Шпачук²
М. В. Кутіна¹

ОЦІНЮВАННЯ ВІРОГІДНОСТІ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТКИ СТАТОРА БЛОКА «ГЕНЕРАТОР–ТРАНСФОРМАТОР»

¹Вінницький національний технічний університет;

²ВП «Хмельницька атомна електростанція»

Показано, що значне старіння електрообладнання електричних станцій, висока ціна відмов, необхідність продовження його експлуатації, виконання правил техніки безпеки вимагає підвищення надійності контролю технічного стану ізоляції. Аналіз існуючих методів неперервного контролю параметрів технічного стану ізоляції обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором показав їх суттєві недоліки, а саме низький рівень чутливості до зміни параметрів у разі пошкодження ізоляції поблизу нейтралі обмотки статора і при симетричному зниженні параметрів ізоляції окремих фаз. Це не дозволяє виявити пошкодження на ранній стадії його розвитку. Крім цього спостерігається хибне спрацювання засобів контролю через несиметрії фазних напруг.

Для підвищення вірогідності контролю параметрів ізоляції обмотки статора синхронного генератора запропоновано метод, принцип побудови, алгоритм функціонування діагностичного комплексу контролю, а також алгоритм програмного забезпечення, яке використовується для обробки даних вимірювання і визначення параметрів ізоляції обмотки статора на основі мікропроцесора.

Виконано оцінювання вірогідності контролю запропонованого методу контролю ізоляції обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, який ґрунтується на накладанні на коло, що містить обмотку статора, сигналів змінної напруги частотою, нижчою, за номінальну частоту мережі, напруги постійного струму, використання енергії попередньо зарядженого конденсатора та розрахунку параметрів ізоляції блока «генератор–трансформатор».

Наведено вирази для визначення загального активного опору відносно землі і у місці утворення шунтувального зв'язку із землею, еквівалентної ємності ізоляції, тангенса кута діелектричних втрат в ізоляції, ймовірності хибної і невизначеної відмови, вірогідності результатів «придатний» багатопараметричного контролю.

Отримано вирази необхідні для розрахунку вірогідності контролю активного опору відносно землі, перехідного опору в місці утворення шунтувального зв'язку, ємності ізоляції відносно землі, тангенса кута діелектричних втрат ізоляції обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором. За отриманими виразами розраховано вірогідність результату «придатний». Результати розрахунків можуть бути використані під час проектування релейного захисту та систем діагностування електрообладнання нових енергоблоків, а також для реконструкції наявних енергоблоків електричних станцій.

Ключові слова: синхронний генератор, пошкодження ізоляції обмотки статора, вірогідність контролю, інформаційно-вимірювальна система.

Вступ

Проблеми розробки та впровадження методів неперервного контролю технічного стану обладнання блоків «генератор–трансформатор» не втрачають актуальності в Україні через значне старіння основного виробничого обладнання та продовження строків експлуатації електрообладнання електричних станцій.

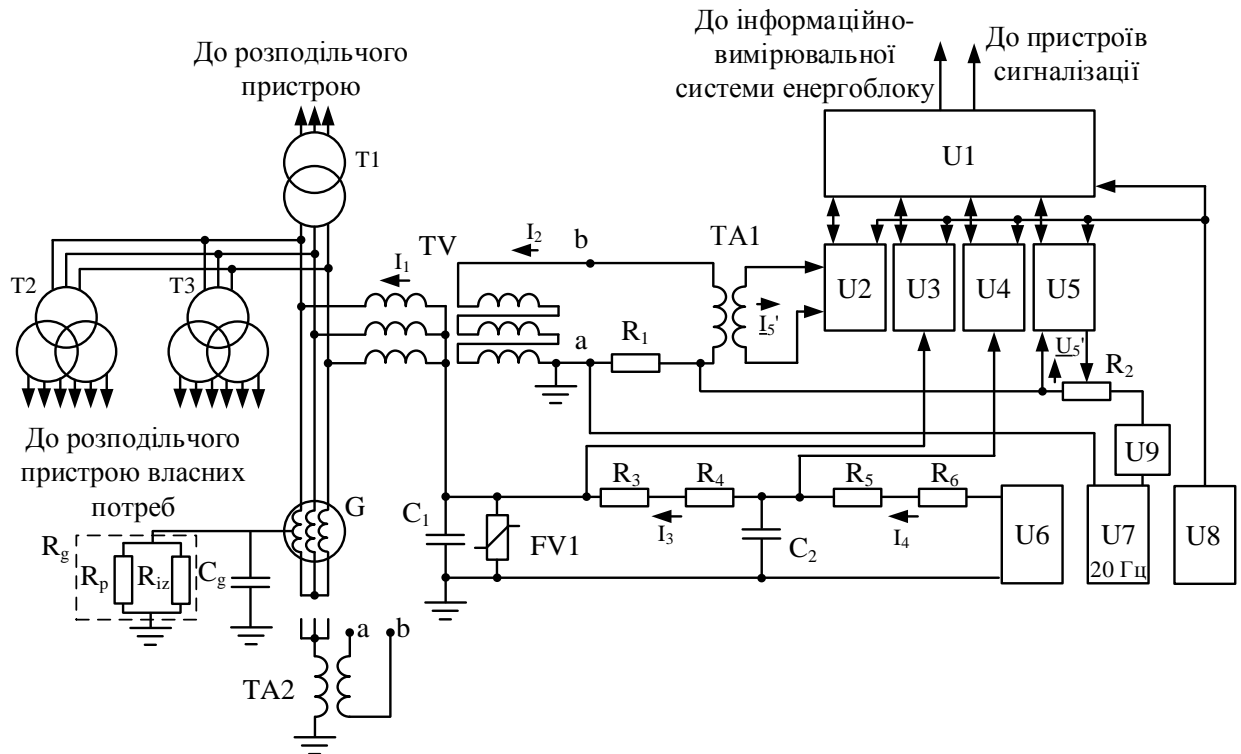
Інформаційно-вимірювальні системи, що експлуатуються в нинішній час на енергоблоках електричних станцій, не дають можливості відстежувати зміну таких електричних параметрів ізоляції

синхронних генераторів як опір ізоляції та ємність, що унеможливує виявлення пошкодження на ранній стадії його розвитку [1], [2]. В свою чергу, засоби релейного захисту через принципові недоліки є нечутливими до виникнення однофазних замикань на землю обмотки статора поблизу нейтралі та у разі симетричного зниження параметрів ізоляції обмотки статора. Крім цього, виникають хибні спрацювання під час пусків блоків через несиметрію напруг у фазах генераторів, особливо гостро це проявляється в синхронних гідрогенераторах [3].

Результати дослідження

Мета роботи — підвищення вірогідності контролю параметрів ізоляції обмотки статора блока генератор–трансформатор шляхом розробки методу його оцінювання.

Структурна схема системи контролю ізоляції блока генератор (G) — трансформатор (Т1) показана на рисунку.



Структурна схема системи контролю ізоляції блока «генератор–трансформатор»

Запропонована система контролю ізоляції працює таким чином. Сигнал змінного струму з частотою, що значно відрізняється від номінальної частоти мережі (наприклад, 20 Гц), від блока накладання змінного струму U7 через смуговий фільтр U9 та резистор R_1 вводиться в схему накладання напруги на статор генератора G через трансформатор напруги TV. До U5 — блока обробки сигналу напруги частотою 20 Гц через резистор R_2 від смугового фільтра U9 підводиться напруга U_5' , що пропорційна нарузі частотою 20 Гц, яка накладається. До блока U2 обробки сигналу струму частотою 20 Гц через трансформатор струму TA1 підводиться струм I_5' , що пропорційний струму I_2 , в колі з джерелом накладеної напруги змінного струму частотою 20 Гц. Сигнал постійного струму формується блоком живлення U6 та через резистори R_4 , R_6 та вимірювальні шунти R_3 , R_5 підводиться до обмотки статора G через нейтральну точку обмотки високої напруги TV. Обробка сигналу здійснюється блоком U4. Сигнал струму розряду попередньо зарядженого конденсатора C_2 формується в результаті виникнення раптового замикання на землю (раптове зниження опору R_p) та надходить на обробку до блока U3 [3], [4]. Ємність C_1 та нелінійний обмежувач перенапруг FV1 встановлюються для забезпечення захисту від завад та можливих перенапруг. Блок живлення U8 забезпечує живлення блоків обробки сигналу напруги частотою 20 Гц U5, обробки сигналу струму частотою 20 Гц U2, обробки сигналу постійного струму, що накладається на статорну обмотку U4, обробки сигналу струму розряду попередньо зарядженого конденсатора U3, а також блока керування U1, що здійснює керування системою контролю ізоляції та формує вихідні сигнали для оперативного персоналу енергоблоку [5].

Згідно з [3] загальний активний опір ізоляції обмотки статора R_{iz} можна визначити, як

$$R_{iz}(U, I_4) = \frac{U}{I_4} - R_3 - R_4 - R_5 - R_6 - R_T, \quad (1)$$

де U — значення прикладеної постійної напруги; R_4 та R_6 — опори резисторів, що формують струм, який накладається на мережу; R_3 та R_5 — опори вимірювальних шунтів; R_T — загальний опір обмотки високої напруги трансформатора напруги типу НТМИ; R_{iz} — загальний опір ізоляції блока «генератор–трансформатор» відносно землі.

Перехідний опір в місці виникнення однофазних замикань на землю становитиме

$$R_p(I_3) = \frac{s + fI_3}{1 + gI_3 + hI_3^2}, \quad (2)$$

де I_3 — сигнал струму розряду попередньо зарядженого конденсатора; s, f, g, h — коефіцієнти, обумовлені параметрами резисторів, а також активним та індуктивним опором первинної обмотки трансформатора напруги типу НТМИ [5].

Еквівалентна ємність ізоляції блока «генератор–трансформатор» відносно землі C_g

$$C_g(I_5, U_5, U, I_4, I_3) = \frac{1}{j\omega} \left(\left(\frac{I_5}{U_5} \right) - \left(\frac{1}{R_p(I_3)} \right) - \left(\frac{1}{R_{iz}(U, I_4)} \right) \right). \quad (3)$$

Якість процедури контролю, ступінь його правдоподібності характеризується вірогідністю контролю. Кількісною оцінкою вірогідності є ймовірність того, що результат контролю відповідає дійсному стану об'єкта [6]. Об'єкт, може бути в одному з можливих станів — справному C або несправному \bar{C} . Імовірність знаходження в C визначається щільністю розподілу можливих значень контрольованої величини $f(x)$ та граничними значеннями допускового інтервалу x_H (нижнє граничне значення допускового інтервалу) і x_B (верхнє граничне значення допускового інтервалу).

$$P(C) = \int_{x_H}^{x_B} f(x) dx. \quad (4)$$

Імовірність виникнення хибної P_X та невиявленої P_H відмови можна отримати, виконавши розрахунки за такими виразами:

$$P_X = \int_{x_H}^{x_B} f(x) \int_{-\infty}^{x_H-x} f_1(y) \cdot d y \overset{\circ}{\circ} dx + \int_{x_H}^{x_B} f(x) \int_{x_H-x}^{+\infty} f_1(y) \cdot d y \overset{\circ}{\circ} dx; \quad (5)$$

$$P_H = \int_{-\infty}^{x_H} f(x) \int_{x_H-x}^{x_B-x} f_1(y) \cdot d y \overset{\circ}{\circ} dx + \int_{x_B}^{+\infty} f(x) \int_{x_H-x}^{x_B-x} f_1(y) \cdot d y \overset{\circ}{\circ} dx, \quad (6)$$

де $f_1(y) \overset{\circ}{\circ}$ — закон розподілу випадкової похибки вимірювань $y \overset{\circ}{\circ}$.

З виразів для абсолютних показників багатопараметричного контролю, можна отримати вирази для вірогідності результатів «придатний» [6].

$$D(\Pi) = \frac{\prod_{i=1}^n (P(C_i) - P_{Xi})}{\prod_{i=1}^n (P(C_i) - P_{Xi} - P_{Hi})}. \quad (7)$$

Розрахуємо імовірності контролю загального активного опору ізоляції, перехідного опору в місці виникнення однофазних замикань на землю, еквівалентної ємності ізоляції блока «генератор–трансформатор» відносно землі.

Аналitичні вирази, необхідні для виконання зазначених розрахунків, є досить громіздкими для відображення їх в цій статті, тому нижче, для прикладу, показані вирази (8)—(11), необхідні для розрахунку вірогідності контролю за параметром перехідного опору в місці замикання на землю $D_{R_p}(\Pi)$, де P_{CRPl3} — імовірність того, що перехідний опір в місці замикання на землю знаходиться

в допусковому інтервалі за параметром сигналу струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, P_{XRpI_3} — імовірність хибної відмови за параметром сигналу струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, P_{HRpI_3} — імовірність невизначеної відмови за параметром сигналу струму розряду попередньо зарядженого конденсатора.

$$P_{CRpI_3} = \int_{I_{3\min}}^{I_{3\max}} \left(\frac{s + fI_3}{1 + gI_3 + hI_3^2} \right) dI_3; \quad (8)$$

$$P_{XRpI_3} = \int_{I_{3\min}}^{I_{3\max}} \left(\frac{s + fI_3}{1 + gI_3 + hI_3^2} \right) \int_{-\infty}^{I_{3H} - I_3} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\Delta I_3)^2}{2\sigma^2}} d\Delta I_3 dI_3 + \int_{I_{3\min}}^{I_{3\max}} \left(\frac{s + fI_3}{1 + gI_3 + hI_3^2} \right) \int_{I_{3B} - I_3}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\Delta I_3)^2}{2\sigma^2}} d\Delta I_3 dI_3; \quad (9)$$

$$P_{HRpI_3} = \int_{-\infty}^{I_{3\min}} \left(\frac{s + fI_3}{1 + gI_3 + hI_3^2} \right) \int_{I_{3H} - I_3} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\Delta I_3)^2}{2\sigma^2}} d\Delta I_3 dI_3 + \int_{I_{3\max}}^{+\infty} \left(\frac{s + fI_3}{1 + gI_3 + hI_3^2} \right) \int_{I_{3H} - I_3} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\Delta I_3)^2}{2\sigma^2}} d\Delta I_3 dI_3; \quad (10)$$

$$D_{R_p}(\Pi) = \frac{P_{CRpI_3} - P_{XRpI_3}}{P_{CRpI_3} - P_{XRpI_3} + P_{HRpI_3}}. \quad (11)$$

Під час розрахунку вищезазначених ймовірностей за співвідношеннями (4)—(6) для виразу (3) за параметрами змінної напруги та струму частотою 20 Гц, що накладаються на статорну обмотку, варто звернути увагу, що значення параметрів є комплексними, тому розрахунок потрібно виконувати з урахуванням таких співвідношень:

$$\int_l f(z) dz = \int_l u dx - v dy + j \int_l u dy - v dx, \quad (12)$$

де $f(z)$ — функція комплексної змінної неперервна на l , $u = \operatorname{Re} f(z)$ — дійсна частина комплексної функції, $v = \operatorname{Im} f(z)$ — уявна частина комплексної функції, $u = u(x, y)$; $v = v(x, y)$.

Для розрахунків показників вірогідності контролю опору ізоляції обмотки статора відносно землі, перехідного опору в місці замикання на землю та еквівалентної ємності ізоляції обмотки статора генератора, приймаємо такі вихідні дані $s = 3,6711 \cdot 10^8$; $f = -1,4166 \cdot 10^{11}$; $g = 2,6053 \cdot 10^6$; $h = -1,0077 \cdot 10^9$; $I_{3B} = 30 \cdot 10^{-3}$ (А); $I_{3H} = 1 \cdot 10^{-3}$ А, $I_3 = 15 \cdot 10^{-3}$ А; $R_3 = R_4 = 0,1$ Ом; $R_5 = R_6 = 2$ кОм; $R_7 = 1$ кОм; $U = 140$ В; $U_B = 1,2 \cdot U$; $U = 1$ В, діюче значення $U_5 = 40$ В, діюче значення $U_{5B} = 1,2 \cdot U_5$, діюче значення $U_{5H} = 0,9 \cdot U_5$, діюче значення $I_5 = 15 \cdot 10^{-3}$ А, діюче значення $I_{5B} = 1,1 \cdot I_5$, діюче значення $I_{5H} = 0,9 \cdot I_5$. Результати розрахунку показують, що вірогідність контролю за параметром загального активного опору ізоляції становить 0,938 в.о., за параметром перехідного опору в місці замикання на землю 0,986 в.о., за параметром еквівалентної ємності ізоляції блока «генератор–трансформатор» відносно землі 0,955 в.о.

Висновки

В роботі запропоновано метод та структурну схему системи контролю ізоляції, параметрів обмотки статора кола блока «генератор–трансформатор», а також розглянуто основні співвідношення для обробки сигналів контрольованих параметрів та виконано аналіз вірогідності контролю запропонованого методу контролю ізоляції обмотки статора блока «генератор–трансформатор».

Реалізація запропонованої системи контролю ізоляції в схемі видачі потужності енергоблока дозволить підвищити ефективність експлуатації енергоблоків завдяки забезпеченню оперативного та ремонтного персоналу достовірною інформацією про технічний стан обладнання, прогнозуванню зміни технічного стану ізоляції і реалізації ремонту та обслуговування електрообладнання за технічним станом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Э. М. Шнеерсон, *Цифровая релейная защита*. Москва, Российская Федерация: Энергоатомиздат, 2007, 549 с.
- [2] Р. А. Вайнштейн, Р. Б. Тентиев, и С. М. Юдин, «Повышение надежности защиты генераторов от замыканий на землю, основанной на наложении вспомогательного тока с частотой 25 Гц,» *Известия Томского политехнического университета*, № 4, с. 96-100, 2008.

- [3] В. М. Кутін, і О. О. Шпачук, *Захист від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2019, 183 с.
- [4] В. М. Кутін, і О. О. Шпачук, «Удосконалення засобів захисту від однофазних замикань на землю в обмотці статора синхронного генератора.» *Проблеми аварійності та діагностики в електромеханічних системах та електричних машинах*, № 2 (22), ч. 2, с. 393-396, 2013.
- [5] В. М. Кутін, і О. О. Шпачук, «Вдосконалення методу контролю ізоляції блока «генератор–трансформатор,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 39-44, 2020.
- [6] Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, і Г. Б. Сердюк, *Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю*, навч. посіб. Вінниця, Україна: ВДТУ, 2001, 219 с.
- [7] Б. Н. Неклепаев, и И. П. Крючков, *Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования*, учеб. пос. для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1989, 608 с. ISBN 5-283-01086-4.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.04.2021

Кутін Василь Михайлович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, e-mail: vmkytin@gmail.com ;

Кутіна Марина Василівна — канд. техн. наук, доцент, старший викладач кафедри електротехнічних систем електропозживання та енергетичного менеджменту, e-mail: mkytina@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Шпачук Олександр Олександрович — канд. техн. наук, інженер, e-mail: shpachuk2@gmail.com .

ВП «Хмельницька атомна електростанція»

V. M. Kutin¹
O. O. Shpachuk²
M. V. Kutina¹

Evaluation of the Probability Parameters of Insulation Control of the Stator Windings “Generator-Transformer” Unit

¹Vinnytsia National Technical University;

²Khmelnitsky Nuclear Power Plant

It is shown that significant aging of electrical equipment of power plants, high cost of failures, the need to continue its operation, compliance with safety rules requires increasing the reliability of monitoring the technical condition of insulation. Analysis of existing methods of continuous monitoring of the technical condition of the insulation of the stator winding of a synchronous generator operating in a unit with a transformer showed their significant shortcomings, namely the low sensitivity to changes in insulation damage near the neutral of the stator winding and symmetrical reduction of insulation parameters. This does not allow to detect damage at an early stage of its development. In addition, there is a faulty operation of the controls due to asymmetries of phase voltages.

To increase the probability of controlling the insulation parameters of the stator winding of the synchronous generator, the method, principle of construction, algorithm of diagnostic control complex, as well as software algorithm used to process measurement data and determine the insulation parameters of the stator winding based on microprocessor.

The probability of control of the proposed method of controlling the insulation of the stator winding of a synchronous generator operating in a unit with a transformer based on the superimposition on the circuit containing the stator winding, AC signals with a frequency lower than the rated frequency, DC voltage, use the energy of the pre-charged capacitor and the calculation of the insulation parameters of the "generator-transformer" unit.

Expressions are given to determine the total active resistance relative to the ground and at the place of formation of the shunt connection with the ground, the equivalent insulation capacity, the tangent of the dielectric loss angle in the insulation, the probability of false and indefinite failure, the probability of "suitable" multiparameter control.

The expressions necessary for calculating the probability of control of active resistance relative to ground, transient resistance at the place of shunt formation, insulation capacity relative to ground, tangent of dielectric loss angle of stator winding of synchronous generator operating in block with transformer are obtained. Based on the obtained expressions, the probability of the result "suitable" is calculated. The results of calculations can be used in the design of relay protection and diagnostic systems for electrical equipment of new power units, as well as in the reconstruction of existing power units of power plants.

Keywords: synchronous generator, stator winding insulation damage, control probability, information-measuring system.

Kutin Vasyl M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electromechanical Automation Systems in Industry and Transport, e-mail: vmkytin@gmail.com ;

Shpachuk Oleksandr O. — Cand. Sc. (Eng.), Engineer, e-mail: shpachuk2@gmail.com ;
Kutina Maryna V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Senior Lecturer of the Chair of Electrical Power Supply Systems and Energy Management, e-mail: mkytina@gmail.com

В. М. Кутин¹
А. А. Шпачук²
М. В. Кутина¹

Оценка достоверности контроля параметров изоляции обмотки статора блока «генератор–трансформатор»

¹Винницкий национальный технический университет;

²ОП «Хмельницкая атомная электростанция»

Показано, что значительное старение электрооборудования электрических станций, высокая цена отказов, необходимость продолжения его эксплуатации, выполнение правил техники безопасности требует повышения надежности контроля технического состояния изоляции. Анализ существующих методов непрерывного контроля параметров технического состояния изоляции обмотки статора синхронного генератора, работающего в блоке с трансформатором, показал их существенные недостатки, а именно низкий уровень чувствительности к изменению параметров при повреждении изоляции вблизи нейтрали обмотки статора и при симметричном снижении параметров изоляции отдельных фаз. Это не позволяет выявить повреждения на ранней стадии его развития. Кроме того, наблюдается ложное срабатывание средств контроля из-за несимметрии фазных напряжений.

Для повышения достоверности контроля параметров изоляции обмотки статора синхронного генератора предложен метод, принцип построения, алгоритм функционирования диагностического комплекса контроля, а также алгоритм программного обеспечения, которое используется для обработки данных измерения и определения параметров изоляции обмотки статора на основе микропроцессора.

Произведена оценка достоверности контроля предложенного метода контроля изоляции обмотки статора синхронного генератора, работающего в блоке с трансформатором, который основывается на наложении на цепь, включающую обмотку статора, сигналов переменного напряжения частотой ниже, номинальной частоты сети, напряжения постоянного тока, использования энергии предварительно заряженного конденсатора и расчета параметров изоляции блока «генератор–трансформатор».

Приведены выражения для определения общего активного сопротивления относительно земли и в месте образования шунтирующих связей с землей, эквивалентной емкости изоляции, тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции, вероятности ложного и неопределенного отказа, достоверности результатов «годен» многопараметрического контроля.

Получены выражения, необходимые для расчета достоверности контроля активного сопротивления относительно земли, переходного сопротивления в месте образования шунтирующих связей, емкости изоляции относительно земли, тангенса угла диэлектрических потерь изоляции обмотки статора синхронного генератора, работающего в блоке с трансформатором. По полученным выражениям рассчитана вероятность результата «годен». Результаты расчетов могут быть использованы при проектировании релейной защиты и систем диагностирования электрооборудования новых энергоблоков, а также при реконструкции существующих энергоблоков электростанций.

Ключевые слова: синхронный генератор, повреждения изоляции обмотки статора, достоверность контроля, информационно-измерительная система.

Кутин Василий Михайлович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: vmkytin@gmail.com ;

Шпачук Александр Александрович — канд. техн. наук, инженер, e-mail: shpachuk2@gmail.com ;

Кутина Марина Васильевна — канд. техн. наук, доцент, старший преподаватель кафедры электротехнических систем электроснабжения и энергетического менеджмента, e-mail: mkytina@gmail.com