

Исследование процессов в синхронных генераторах при внутренних коротких замыканиях

КАППЕС А.Д., АПРОСИН К.И.

Рассматривается метод пространственного моделирования электромагнитных процессов в синхронном генераторе. Принцип построения модели основан на уравнениях Максвелла в интегральной форме, описывающих электромагнитное поле и его связь с электрическими токами. С помощью программного комплекса Comsol Multiphysics разработана модель турбогенератора ТГВ-200. В основе расчетов данного программного пакета лежит метод конечных элементов для определения дифференциальных уравнений с частными производными. Генератор представлен в двумерном пространстве в виде поперечного сечения, геометрические размеры которого обуславливают его электромагнитные свойства. В данной статье рассмотрены различные режимы работы турбогенератора, включая режимы нормальной и асинхронной работы, а также внутреннего и внешнего короткого замыкания. Особенность данного исследования в том, что рассмотренный способ моделирования позволяет получать мгновенные значения токов и напряжений в нейтрали и на выводах генератора при внутренних коротких замыканиях.

К л ю ч е в ы е с л о в а: синхронный генератор, внутреннее короткое замыкание, метод конечных элементов, режимы нормальной и асинхронной работы, режимы внутреннего и внешнего короткого замыкания

Короткое замыкание внутри генератора приводит к крайне нежелательным последствиям: длительный ремонт, опасность взрыва и/или пожара и полное разрушение турбогенератора, который является весьма дорогостоящим оборудованием. В период с 2001–2005 гг. 22,9% аварий связано с пробоем изоляции на землю, а 16,9% – с межфазными короткими замыканиями [1]. Результаты различных аварий, приведших к тяжелейшим последствиям, приведены в [2].

Для моделирования схем, содержащих вращающиеся машины, применяют вращающиеся прямоугольные системы координат оси d, q , жестко связанные с ротором машины (собственные оси), а также ось нулевой последовательности 0.

Жестко связанные с ротором оси d, q используют при моделировании несимметричных в магнитном или электрическом отношении машин. Обычно эти оси называют собственными d, q осями. Преобразование фазных переменных к переменным в собственных d, q осях является единственным преобразованием, которое приводит дифференциальные уравнения синхронной машины с периодическими коэффициентами к уравнениям с постоянными коэффициентами. Это преобразование имеет фундаментальное значение в теории переходных процессов синхронной машины [3].

Уравнения Парка–Горева описывают идеализированную машину во вращающихся собственных

осях d, q и базируются на следующих основных допущениях [4].

1. **Магнитная проницаемость стали машины принимается равной бесконечности.** Это позволяет однозначно определить картину магнитного поля от какой-либо обмотки машины и использовать принцип наложения при определении магнитного поля в зазоре машины.

2. **Распределение магнитных полей** самоиндукции трехфазных обмоток и взаимной индукции обмоток статора и ротора вдоль окружности машины **считается синусоидальным** с пространственным полупериодом, равным полюсному делению.

3. Принятая идеализация картины магнитного поля предполагает, что **магнитопровод и обмотки машины симметричны.** Это значит, что магнитопровод имеет одинаковые очертания на всех полюсных делениях, а в пределах полюсного деления симметричен относительно осей d и q . Это также значит, что в трехфазной обмотке все фазные обмотки имеют одинаковое число витков, активные сопротивления и взаимный сдвиг магнитных осей; стержни демпферной системы симметричны относительно осей d и q , а обмотка возбуждения идентична на всех полюсах ротора.

4. **Демпферная система** явнополюсных машин или бочка ротора неявнополюсных машин **замещается двумя эквивалентными контурами** по одному в оси d и в оси q с постоянными параметрами.

5. Предполагается, что в продольной и поперечной осях машины кроме потоков рассеяния существуют единые потоки взаимной индукции, пронизывающие все контуры, расположенные по соответствующим осям машины.

Практика моделирования показала, что эти допущения являются приемлемыми для явнополюсных генераторов и более грубыми для неявнополюсных турбогенераторов, сверхпереходные параметры которых не поддаются точному расчету и оцениваются по приближенным полуэмпирическим формулам [5, 6]. Неточная модель демпферной системы искажает индивидуальное и групповое движение турбогенераторов при сильных возмущениях. Поэтому ротор турбогенераторов рекомендуется моделировать с использованием многоконтурных схем замещения бочки ротора, постоянные параметры которых синтезируются на основе экспериментальных частотных характеристик [7]. По вопросу синтеза параметров многоконтурных схем замещения ротора синхронных машин опубликовано большое число работ, предложены типовые характеристики и параметры демпферных контуров турбогенераторов [8], которые можно использовать при отсутствии более точной исходной информации.

Учет насыщения стали позволяет получить более точные и надежные результаты, поскольку насыщенные и ненасыщенные значения реактивностей взаимной индукции таких генераторов заметно различаются. Поэтому разработаны методы учета насыщения стали машины [9], которые не требуют специфической информации о конструкции статора и ротора машины и при этом обладают приемлемой точностью при решении практических задач, однако несостоятельны при несимметричных режимах.

Ключевым недостатком использования системы уравнений Парка–Горева является третье допущение, при котором обмотки генератора принимаются симметричными. Данное ограничение делает невозможным расчет внутренних КЗ и асинхронного хода с ЭЦК внутри обмотки синхронного генератора, потому что в этом случае система становится несимметричной и витки обмоток оказываются в различных состояниях.

Согласно [10] вычислительные трудности, связанные с необходимостью решения уравнений, содержащих периодические функции, будут сняты совершенствованием вычислительных машин и упрощением программирования. Тогда, вероятно, будет разумным возвращение к естественной системе трехфазных координат.

Для получения правдоподобных токов и напряжений генератора необходимо пространственное моделирование магнитной системы (электромагнитного ядра) генератора.

Принцип совместного моделирования магнитной системы генератора и внешней сети. Расчетная процедура моделирования магнитной системы генератора заключается том, что в модель обмотки ротора подается ток возбуждения, который создает магнитное поле ротора. Распределение магнитной индукции рассчитывается во всех точках по всей площади поперечного разреза. На основании расчета магнитной индукции рассчитывается ЭДС, наводимая в каждом пазе обмотки статора. На этом расчет распределения магнитного поля можно было бы закончить. Но для того чтобы использовать этот метод для получения параметров переходного процесса, необходимо добавить к геометрической модели магнитной системы генератора модель электрической сети, к которой этот генератор подключен.

На рис. 1 изображена электрическая система, в которую вводятся ЭДС трех катушечных групп для каждой фазы. Трансформатор представлен упрощенно в виде сопротивления, за которым находится шунт на землю для моделирования нагрузки, а между системой и трансформатором находится линия 100 км.

На рис. 2 представлена схема обмотки возбуждения, где ток возбуждения задается источником тока, но имеется также источник напряжения, значение которого определяется значением ЭДС электромагнитной индукции, которое наводится в обмотке возбуждения от поля статора.

Для решения задачи на катушку возбуждения подается ток, который создает магнитный поток. Этот магнитный поток наводит напряжение в обмотке статора. Далее, интегрируя наведенную ЭДС в пазах статора, оно усредняется по площади паза. В результате получается ЭДС генератора, значение которой присваивается источнику напряжения в электрической модели (рис. 1). Из электрической модели токи с предыдущего шага по времени подаются обратно в магнитную модель в виде плотности тока, распределенной по площади паза статора, создавая реакцию якоря.

Для ротора также вводится электрическая схема, где имеется ЭДС, которая получается путем интегрирования пазов ротора по ЭДС обмотки возбуждения, чтобы учесть переходный процесс в ней. В результате расчета сети получаются мгновенные значения тока и напряжения статора и ротора генератора. Эти значения будут использованы на сле-

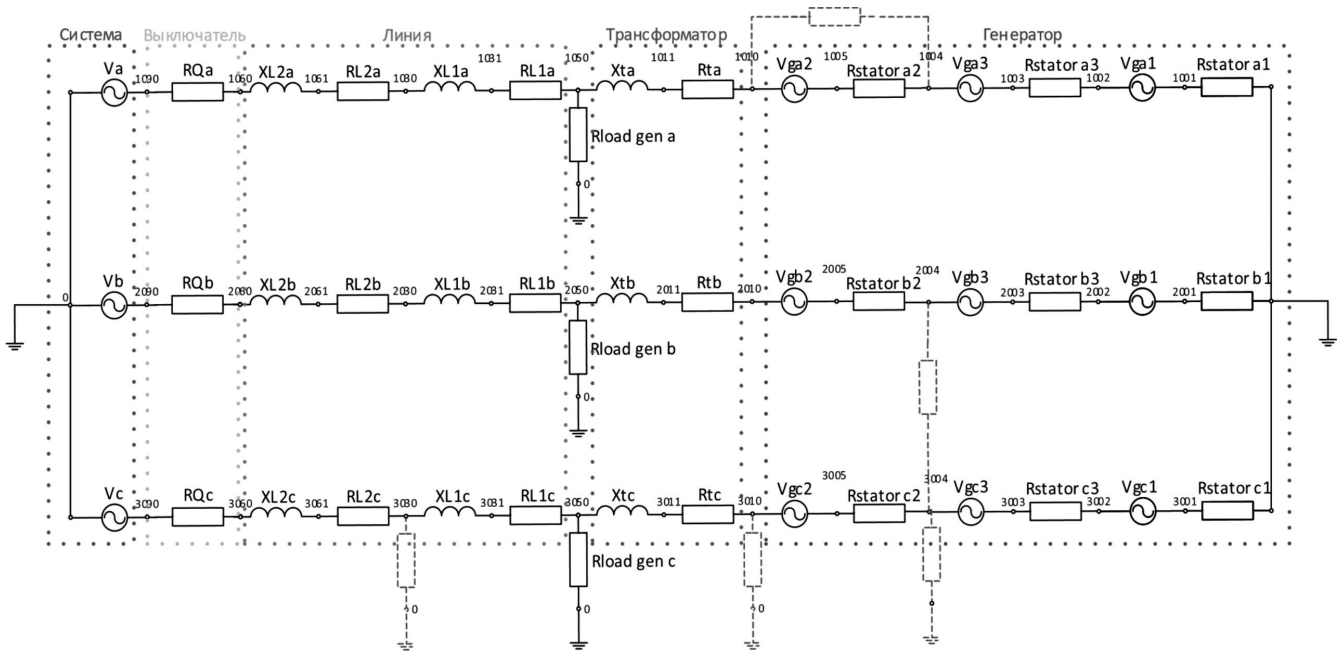


Рис. 1. Электрическая схема для совместного моделирования с пространственной моделью генератора

дующем шаге для вычисления индукции и потока генератора.

Математическое описание модели. Турбогенератор моделируется с помощью интерфейса Rotating Machinery, Magnetic с помощью которого рассчитываются уравнения Максвелла. В теории Максвелла решается основная задача электродинамики – по заданному распределению токов и зарядов определяются характеристики электрического и магнитного полей. В этом интерфейсе используются два подхода для решения уравнений: в виде векторного потенциала и скалярная формулировка потенциала. Для решения задачи в 2D более корректным будет решение в векторной форме, чтобы рассчитывать поле по оси Z.

Определение распределения поля выполняют три уравнения Максвелла в дифференциальной форме:

закон электромагнитной индукции Фарадея:

$$B = \nabla \times A; \tag{1}$$

закон полного тока:

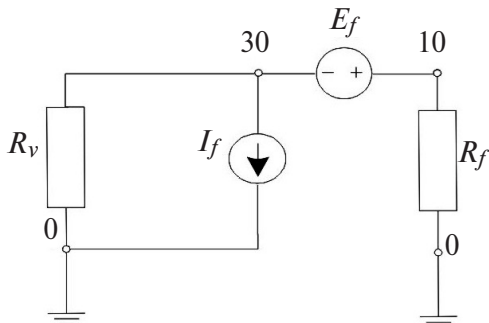


Рис. 2. Электрическая схема обмотки возбуждения генератора

$$\sigma = \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H = J_e; \tag{2}$$

закон сохранения магнитного потока Гаусса:

$$\nabla(\mu_0 \mu_r H) = 0, \tag{3}$$

где A – магнитный векторный потенциал, Вб/м; μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; B – магнитная индукция, Тл; H – напряженность магнитного поля, А/м; J_e – плотность электрического тока, А/м²; σ – электрическая проводимость, См/м.

На основании этих уравнений рассчитывается изменение магнитной индукции во времени:

$$\Phi = \int_S B dS \cos \alpha; \tag{4}$$

$$\varepsilon = -d\Phi / dt. \tag{5}$$

Согласно закону электромагнитной индукции при всяком изменении магнитного потока (4), пронизывающего контур, в нем возникает ЭДС индукции ε (5), равная скорости изменения магнитного потока, взятой с обратным знаком. Данное значение ЭДС возникает под воздействием изменения магнитного поля от обмотки возбуждения.

В данной модели используется две системы координат. Первая – неподвижная декартова система координат, которая называется пространственной, вторая – материальная, которая привязана к ротору для слежения за движением точки при ее вращении. Интерфейс Electric Field Transformation отвечает за связь между этими двумя системами по формуле:

$$E_{spatial} = E_{material} + v \times B, \quad (6)$$

где v – скорость вращения, рад/с.

Уравнения Максвелла дополняются системой материальных уравнений, которые характеризуют индивидуальные свойства заполняющей пространство материальной среды. Данные уравнения вводятся в модель через интерфейс Ampere's Law:

$$B = \mu_0 \mu_r H; \quad (7)$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E; \quad (8)$$

$$J_{пр} = \sigma E, \quad (9)$$

где $J_{пр}$ – ток проводимости, А; D – электрическая индукция, Кл/м²; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; σ – электрическая проводимость, См/м.

Постоянные значения μ_r , ε_r и σ – задаются в модели через свойства материалов, поэтому для каждого домена в модели должен быть задан материал.

В модуле Prescribed Rotational Velocity задается скорость вращения, равная 3000 об/мин, и угол ротора, который определяет значение активной мощности, выдаваемой генератором. В данном представлении задачи она не изменяется, потому что скорость вращения постоянная.

Ток обмотки возбуждения вносится в модель через интерфейс External Current Density. Также с помощью этого интерфейса в модель вводятся наведенные от тока возбуждения токи трех фаз статора и токи в демпферной обмотке:

$$J_e = -(I/S)K_{zap}, \quad (10)$$

где I – ток, протекающий по проводнику, А; S – площадь проводника, м²; $K_{zap} = S_{пр}/S_{пп}$ – коэффициент заполнения паза, равный отношению площади паза к площади активного проводника.

Интерфейс Magnetic Insulation задает граничные условия распределения поля: тангенциальная компонента магнитного поля и условие магнитной изоляции:

$$n \times A = 0; \quad (11)$$

$$n \times B = 0. \quad (12)$$

Переменными величинами в данной постановке задачи расчета распределения магнитного поля являются: векторный потенциал электромагнитного поля A , Вб/м; электрический ток I , А; напряжение U , В; ЭДС самоиндукции E , В.

Для решения задачи также требуется задать переменные и константы, которые определяются пользователем.

Для каждого слоя ротора рассчитывается ЭДС путем интегрирования значения ЭДС, которая наводится в точке по площади слоя, и усреднения этого значения путем деления на площадь паза этого слоя:

$$E_{fi} = \int_0^{S_{fni}} \frac{IE}{S_{fi}} dE - \int_0^{S_{foti}} \frac{IE}{S_{fi}} dE, \quad (13)$$

где E – ЭДС электромагнитной индукции в точке, В; L – длина генератора, м; S_{fi} – площадь сечения одного витка обмотки возбуждения, м².

То же самое для каждой катушечной группы трех фаз обмотки статора:

$$E_{Ni} = \int_0^{S_{intopNini}} \frac{LE}{S_j} dE - \int_0^{S_{outtopNini}} \frac{LE}{S_j} dE, \quad (14)$$

где S_j – площадь поперечного сечения отдельно взятого элемента j -го слоя обмотки статора, м²; N – фазы A, B, C ; i – номер группы в фазе.

В связи с тем что четыре слоя обмотки возбуждения соединяются последовательно, ЭДС обмотки ротора находится по формуле:

$$E_f = \sum_i^{N_f-1} E_{fi}, \quad (15)$$

где N_f – число слоев обмотки возбуждения.

Чтобы найти ток I_i , протекающий по стержню i демпферной обмотки (рис. 3,а), необходимо воспользоваться методом наложения при разложении демпферной обмотки, состоящей из N_d , на две схемы замещения.

Первая схема (рис. 3,б) необходима для того, чтобы найти ток I_{ii} , который индуцируется в стержне от ЭДС E_i , а вторая схема (рис. 3,в) чтобы найти все токи I_{ij} , протекание по стержню которых обусловлено источниками всех остальных стержней N_d-1 :

$$E_i = \int_0^{S_{outtopNini}} \frac{LE}{S_i} dE;$$

$$E_{dsum} = \int_0^{S_{dsum}} \frac{LE}{S_d} dE;$$

$$I_{ii} = \frac{E_i}{R_d + \frac{R_d}{N_d-1}};$$

$$I_{ij} = \frac{E_j}{R_d + R_d};$$

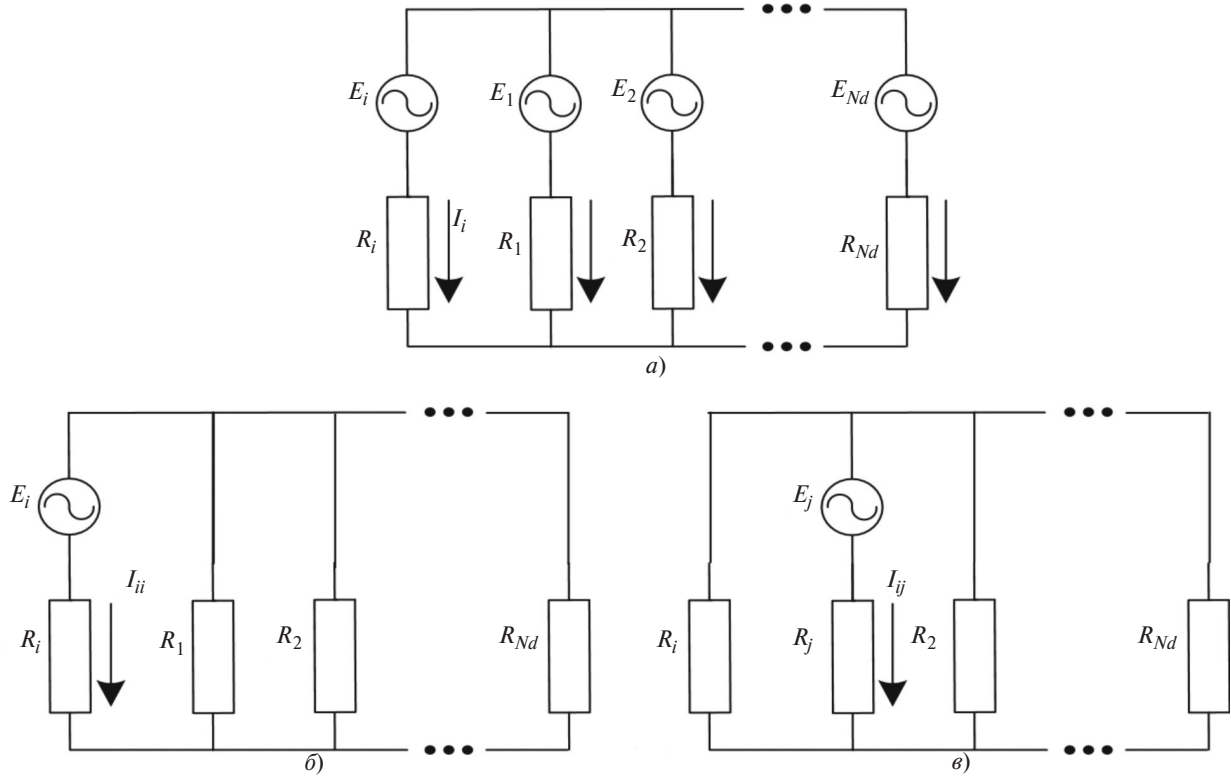


Рис. 3. Схема замещения демпферной обмотки

$$I_i = I_{ii} - I_{ij} = \frac{E_i}{R_d + \frac{R_d}{N_d - 1}} - \sum_j^{N-1} \frac{E_j}{2R_d} = \frac{E_i}{R_d + \frac{R_d}{N_d - 1}} - \frac{E_{dsum} - E_i}{2R_d},$$

где I_i – ток, протекающий по выбранному стержню; I_{ii} – ток, вызванный ЭДС этого стержня E_i ; I_{ij} – ток, обусловленный ЭДС других стержней E_j демпферной обмотки; R_d – сопротивление дюралюминиевого стержня; N_d – число демпферных стержней; E_{dsum} – ЭДС, наводимая во всех стержнях.

Особенностью данной задачи является необходимость ускорения расчета. В связи с этим методом решения нелинейных уравнений был выбран метод Ньютона с постоянным шагом, при котором якобиан пересчитывается на каждой итерации. В качестве допустимого критерия расчета было установлено, что итерационный расчет прекращается, если значение невязки меньше допустимой невязки, равной 0,001, или были посчитаны две итерации. Это грозит тем, что режим разойдется, потому что после двух итераций может остаться значительная невязка.

Для решения линейных уравнений в программе Comsol имеются три решателя SPOOLES, MUMPS и PARDISO. Все они используют LU -разложение

для расчета матричной задачи. Все прямые решатели требуют массу оперативной памяти RAM, но MUMPS и PARDISO могут хранить решение вне ядра, что означает, что они могут использовать при решении некоторых задач жесткий диск (создают файл подкачки). Решатель MUMPS поддерживает также кластерные вычисления, позволяющие использовать больший объем памяти, нежели предоставленный единственной машиной.

В качестве метода пошагового изменения времени был выбран метод Generalized alpha в связи с тем, что в отличие от метода BDF он является более быстрым, но менее стабильным. Кроме того, данный метод имеет приоритет по сравнению с методом Рунге–Кутты, потому что он не так эффективен для задач, связанных с уравнениями в частных производных.

Решение задачи на примере турбогенератора ТГВ-200. В качестве примера расчета синхронного генератора был использован турбогенератор ТГВ-200. Важной частью решения является построение сетки, в узлах которой будет рассчитываться система линейных и нелинейных уравнений. Важным критерием является то, чтобы сетка распределялась равномерно, потому что излишне детализированная сетка в отдельных частях может привести к возникновению сингулярности, в которой магнитное поле будет стремиться к бесконечности.

Важной особенностью данной модели является то, что модель состоит из различных материалов, физические свойства которых отличаются. Основное внимание было уделено нелинейности материалов ротора и статора: в данном случае ротор состоит из конструкционной стали 1030, а статор — из анизотропной холоднокатаной стали 3413, магнитная проницаемость которой отличается при прохождении магнитных линий вдоль и поперек. Кривые намагничивания $B(H)$ представлены на рис. 4.

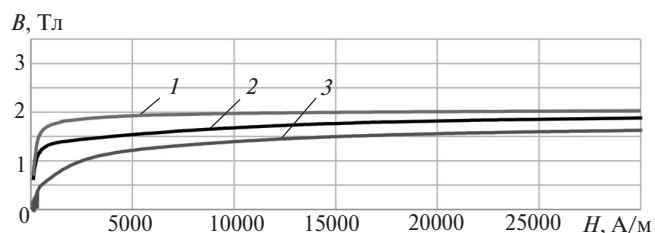


Рис. 4. Характеристики нелинейных материалов: 1 — $B(H)$ поперек 3413; 2 — $B(H)$ вдоль 3413; 3 — $B(H)$ 1030

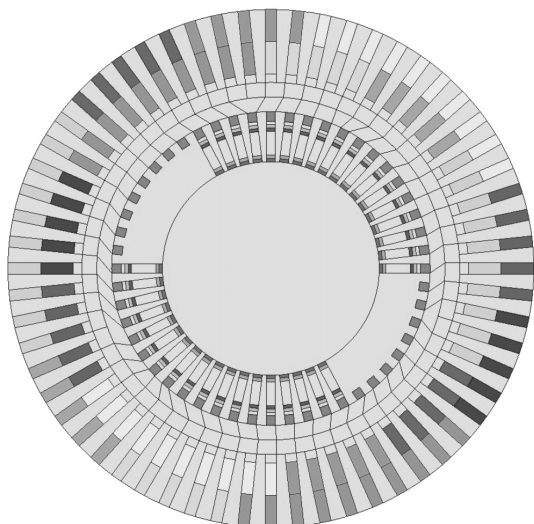


Рис. 5. Пространственная модель магнитной системы генератора с указанием стержней обмотки статора до и после точки замыкания

Обмотка генератора разбивается на три фазы. Каждая фаза состоит из катушечных групп, кото-

рые соединяются последовательно. Фаза в данном генераторе состоит из 40 витков, которые были разбиты на 20/10/10 витков, чтобы дальше последовательно вставить ЭДС в электрическую модель и замыкать их между собой (рис. 1). Распределение катушечных групп показано на рис. 5.

Верификация модели. Действующие значения разрабатываемой пространственной модели представлены далее:

| Параметр | Значение | |
|------------------|------------|---------|
| | Справочное | Comsol |
| U_{Γ} , В | 15750 | 16193,4 |
| I_{Γ} , А | 8650 | 8443,23 |
| φ , град | 31,78 | 32,3017 |
| P , МВт | 200 | 200,16 |
| Q , Мвар | 124,00 | 126,548 |
| I_f , кА | 2100 | 2835 |

Стоит отметить, что номинальные параметры удалось получить, превысив номинальный ток возбуждения турбогенератора на 735 А.

Также для верификации модели были проведены опыты холостого хода и короткого замыкания для вычисления паспортных параметров согласно [12]. Далее приведены результаты испытаний согласно [12]:

| Параметр | Справочные данные | Результаты опытов |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| ОКЗ, отн. ед. | 0,572 | 0,614 |
| x_d , отн. ед. | 1,84 | 1,616 |
| x_d'' , отн. ед. | 0,19 | 0,276 |

Как и следовало ожидать, результаты отличаются от номинальных данных, но погрешность является довольно приемлемой.

Результаты опытов. Были проведены опыты всех возможных замыканий обмотки статора. Конструкция турбогенератора ТГВ-200 допускает возможность возникновения межвиткового короткого замыкания одной фазы, вследствие чего шунтируется сопротивление и ЭДС части витков (рис. 6). Зависимости токов и напряжений на выводах генератора приведены на рис. 7.

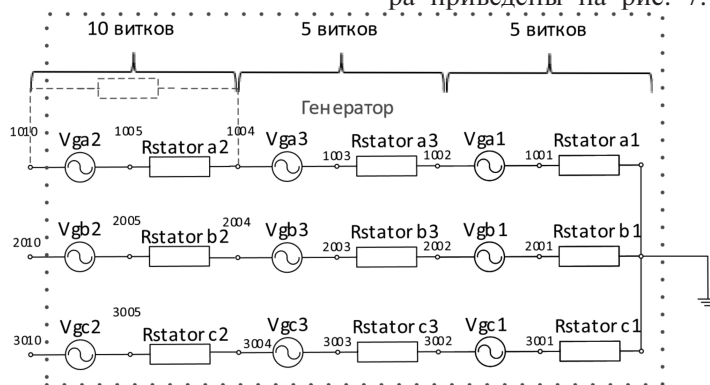


Рис. 6. Схема замещения межвиткового короткого замыкания

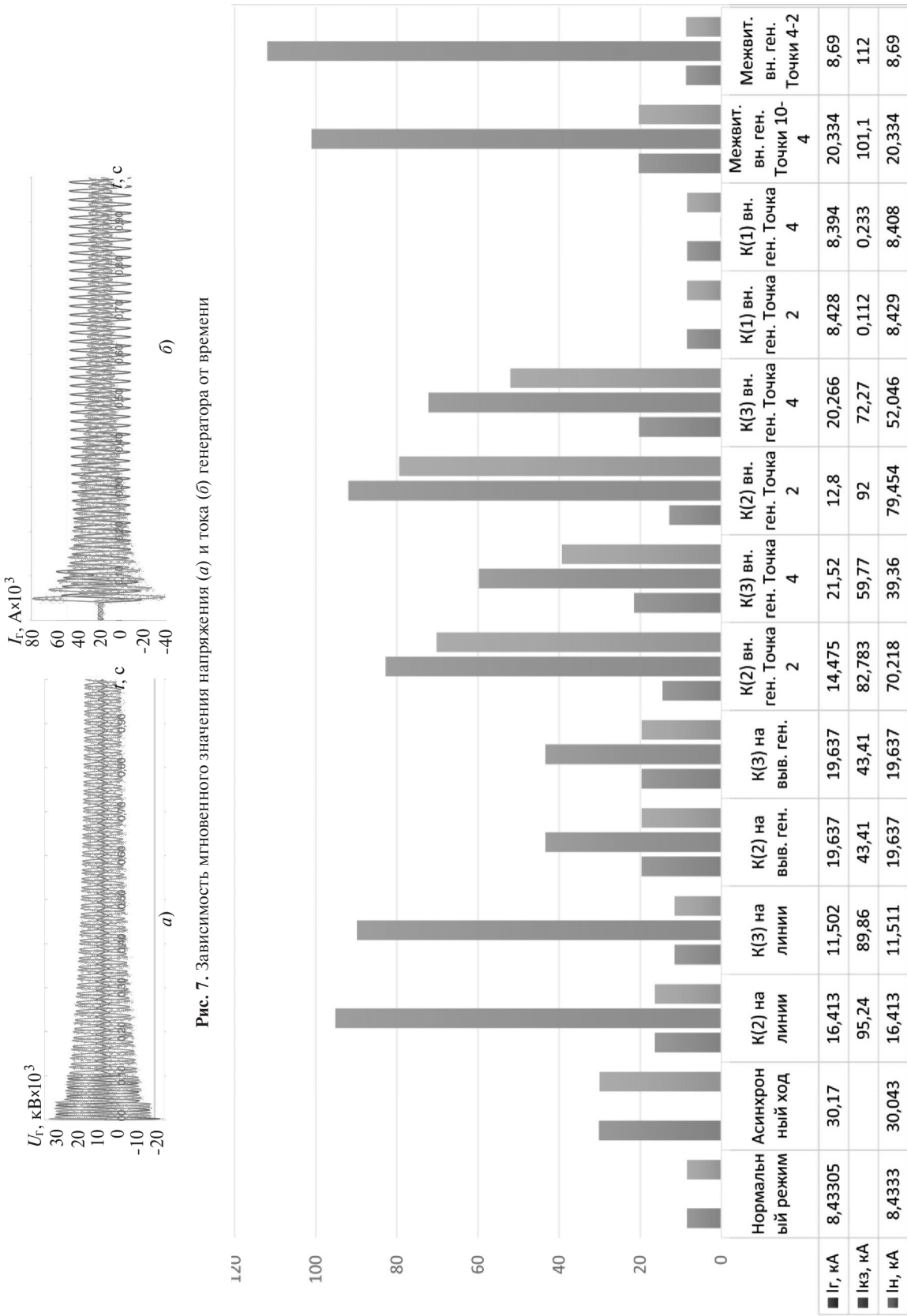


Рис. 7. Зависимость мгновенного значения напряжения (а) и тока (б) генератора от времени

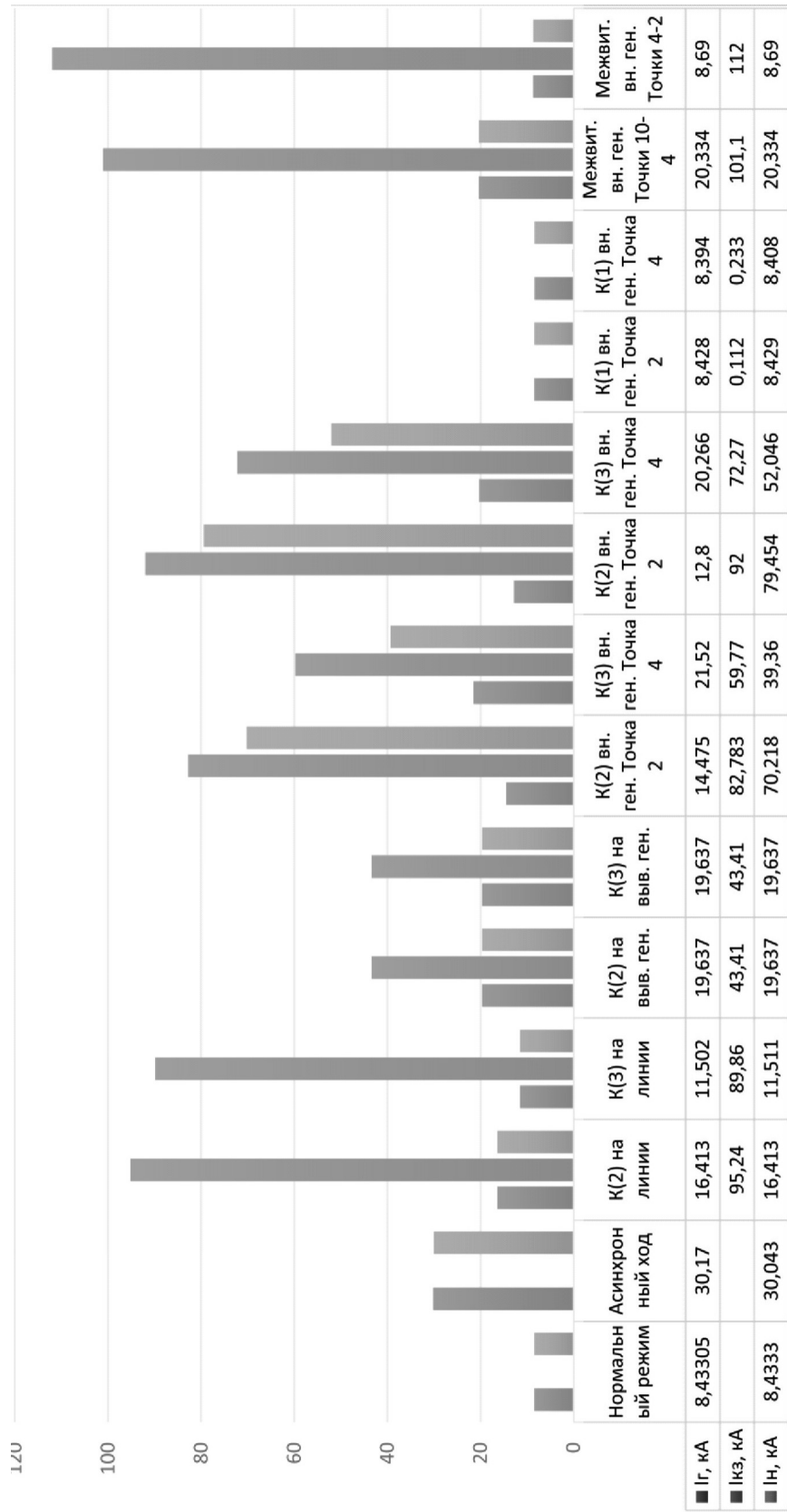


Рис. 8. Результаты расчетов различных режимов

На рис. 8 приведены результаты действующих значений токов при различных режимах для дальнейшего использования их при проверке устройств защит.

Испытание продольной дифференциальной защиты на полученных результатах. В качестве защиты от многофазных замыканий в обмотке статора генераторов мощностью больше 1 МВт и напряжением больше 1 кВ используют продольную дифференциальную токовую защиту без выдержки времени. Тестировалась работа продольной дифференциальной защиты ЭКРА 217 0101 в программе Matlab, принцип работы которой дан в [12].

Защита срабатывает для режимов трехфазных и двухфазных коротких замыканий внутри турбогенератора. Защита нечувствительна при внешних коротких замыканиях, асинхронном и нормальном режимах, при межвитковых замыканиях и замыканиях на корпус. Данный результат является ожидаемым и определяется принципом работы продольной дифференциальной защиты. При этом обмотки генератора соединены последовательно и на нем не может быть установлена поперечная дифференциальная защита и межвитковое короткое замыкание не будет выявлено другими защитами.

Выводы. 1. Проведенная верификация модели путем сравнения ее с моделью на основании уравнений Парка–Горева и определения ее параметров на основании опытов, описанных в ГОСТ 10169-77, показала, что полученные параметры довольно близки к паспортным значениям, что позволяет говорить о том, что модель является удовлетворительной.

2. В программе Simulink была воссоздана модель продольной дифференциальной защиты фирмы ЭКРА и проверено ее срабатывание для всех возможных режимов. Защита во всех режимах сработала правильно.

3. Приведённая методика может представлять практический интерес для производителей устройств защиты и автоматики, а также для эксплуатирующих организаций. Используя данную методику, можно получать тестовые осциллограммы для проверки самых разных устройств защиты, работающих как в цепях статора, так и в цепях ротора. С помощью данной модели можно проводить моделирование, настройку и тестирование систем АРВ, которые можно в нее добавить.

4. С помощью данной модели стали возможны проверка насыщения магнитной системы генератора при различных переходных процессах и обоснование использования насыщенных или ненасыщенных сопротивлений для упрощенной модели генератора. Для практического применения методика нуждается в доработке. Чтобы модель больше была схожа с реальным генератором, в нее необходимо добавить уравнение движения, систему АРВ и трансформатор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самородов Ю.Н. Анализ аварий и инцидентов в работе турбогенераторов в 2001–2005 гг. — Общие вопросы электроэнергетики, 2008, № 3, с. 19–33.
2. Самородов Ю.Н. Причины и последствия аварий и отказов турбогенераторов. — Энергия единой сети, 2014, № 2, с. 70–80.
3. Важнов А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1969, 768 с.
4. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. М.: Госэнергоиздат, 1950, 551 с.
5. Вайнер И.Г. Влияние массива ротора на демпфирование электромеханических колебаний ротора. — Труды ВНИИЭ, 1979, вып. 57, с. 42–53.
6. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.;Л.: Изд. АН СССР, 1962, 626 с.
7. Лукашов Э.С., Каложный А.Х., Гамм Б.З. Определение и использование типовых характеристик и параметров демпферных контуров турбогенераторов. — Электричество, 1977, № 7, с. 27–32.
8. Извеков В.И., Серихин Н.А. Проектирование турбогенераторов. М.: Изд-во МЭИ, 2005, 450 с.
9. Груздев И.А. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов/Под ред. Н.И. Соколова. М.: Энергия, 1970, 400 с.
10. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учебник для электроэнергет. спец. вузов, 4-е изд. М.: Высшая школа, 1985, 536 с.
11. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. Москва, 1984.
12. Руководство по эксплуатации ЭКРА.656122.036/217 0101 РЭ. Терминал защит, автоматики, управления выключателем и сигнализации линии к генератору мощностью до 12 МВт ЭКРА 217 0101. Ред. от 18.11.2016.

[14.10.2019]

А в т о р ы: Каппес Александр Дмитриевич — аспирант кафедры АЭС УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Апросин Константин Игоревич — старший преподаватель кафедры АЭС УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Studying the Processes Triggered in Synchronous Generators by Internal Short Circuit Faults

KAPPES Alexander D. (*Ural Federal University the First President of Russia B.N. Yel'tsin, Yekaterinburg, Russia*) – *Ph.D. student of Nuclear Power Plants Dept.*

APROSIN Konstantin I. (*Ural Federal University the First President of Russia B.N. Yel'tsin, Yekaterinburg, Russia*) – *Senior Teacher of Nuclear Power Plants Dept.*

A method for spatial modeling of electromagnetic processes in a synchronous generator is considered. The model construction principle is based on Maxwell equations in the integral form, which describe the electromagnetic field and its interrelation with electric currents. The model of a TGV-200 turbine generator is developed using the Comsol Multiphysics software package. The computations carried out in this software package are based on the finite element method for solving differential equations with partial derivatives. The generator is represented in a 2D space as a cross section the geometrical sizes of which define its electromagnetic properties. Different turbine generator operation modes, including the modes of its normal and out-of-step operation, and also the conditions of internal and external short-circuit faults are considered. The specific feature of the study is that the considered modeling method makes it possible to obtain instantaneous values of currents and voltages in the neutral and at the generator terminals in the case of internal short-circuit faults.

Key words: *synchronous generator, internal short-circuit fault, finite element method, normal and out-of-step operation modes, internal and external short circuit fault conditions*

REFERENCES

1. **Samorodov Yu.N.** *Obshchiye voprosy elektroenergetik* (General questions of the electric power industry), 2008, No. 3, pp. 19–33.
2. **Samorodov Yu.N.** *Energiya yedinoi seti – in Russ. (Energy of a Unified Network)*, 2014, No. 2, pp. 70–80.
3. **Vazhnov A.I.** *Elektricheskiye mashiny* (Electric cars). L.: Energiya, 1969, 768 p.
4. **Gorev A.A.** *Perekhodnyye protsessy sinkhronnoy mashiny* (Transient processes of a synchronous machine). M.: Gosenergoizdat, 1950, 551 p.
5. **Vayner I.G.** *Trudy VNIIE – in Russ. (Proc. of the VNIIE)*, 1979, iss. 57, pp. 42–53.
6. **Kazovskiy Ye.Ya.** *Perekhodnyye protsessy v elektricheskikh mashinakh peremennogo toka* (Transient processes in AC electric machines). M.; L.: Izd. AN SSSR, 1962, 626 p.
7. **Lukashov E.S., Kalyuzhnyy A.KH., Gamm B.Z.** *Electrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1977, No. 7, pp. 27–32.
8. **Izvekov V.I., Serikhin N.A.** *Proyektirovaniye turbogeneratorov* (Design of turbine generators). Izd-vo MEI, 2005, 450 p.
9. **Gruzdev I.A.** *Primeneniye analogovykh vychislitel'nykh mashin v energeticheskikh sistemakh. Metody issledovaniya perekhodnykh*

protsesov/Pod red. N.I. Sokolova (Gruzdev I.A. The use of analog computers in power systems. Research Methods for Transient Processes / Ed. N.I. Sokolov). M.: Energiya, 1970, 400 p.

10. **Venikov V.A.** *Perekhodnyye elektromekhanicheskiye protsessy v elektricheskikh sistemakh: Uchebnik dlya elektroenerget. spets. vuzov, 4-ye izd.* (Transient electromechanical processes in electrical systems: A textbook for electric power. specialist. universities, 4th ed.). M.: Vysshaya shkola, 1985, 536 p.

11. **GOST 10169-77.** *Mashiny elektricheskiye trekhfaznyye sinkhronnyye. Metody ispytaniy* (Electric three-phase synchronous machines. Test methods). M., 1984.

12. **Rukovodstvo po ekspluatatsii EKRA.656122.036/217 0101 RE.** *Terminal zashchit, avtomatiki, upravleniya vyklyuchatelem i signalizatsii linii k generatoru moshchnost'yu do 12 MVt EKRA 217 0101. Red. ot 18.11.2016* (Operation manual EKRA.656122.036 / 217 0101 OM. Terminal for protection, automation, circuit breaker control and signaling of the line to a generator with a capacity of up to 12 MW EKRA 217 0101. Ed. from 18.11.2016).

[14.10.2019]