

БДПТ на основе ИНС не имеет ошибок в установившемся режиме. Можно заключить, что проектирование систем управления на основе искусственных нейронных сетей является актуальной и востребованной задачей для увеличения эффективности использования и качества управления бесколлекторными двигателями постоянного тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белов М.П., Новиков А.Д. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. – М.: Академия, 2007. – 576 с.
2. N. Leena and R. Shanmugasundaram. Artificial neural network controller for improved performance of brushless DC motor. – International Conference on Power Signals Control and Computations (EPSCICON), 2014, стр. 1–6.
3. Еремеев Н.А., Архипов А.В. Разработка системы управления бездатчиковым бесколлекторным двигателем с помощью микроконтроллера // Материалы VI научно-практической конференции памяти О.В. Успенского / Сборник докладов, – М.: Издательский дом Академии Н.Е. Жуковского, 2019. – 240 с.
4. Славутский Л.А., Славутская Е.В. Выбор структуры нейронной сети для обработки сигналов как планирование эксперимента // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 123-132. – DOI 10.47026/1810-1909-2021-3-123-132.
5. Anatoly Bychkov, Leonid Slavutskii, Elena Slavutskaya. Neural Network for Pulsed Ultrasonic Vibration Control of Electrical Equipment // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con). – P.8936. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216248.
6. Кощев М.И. Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети / М.И. Кощев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 110–118.
7. Кощев М.И. Элементарный перцептрон как инструмент анализа переходных процессов / М.И. Кощев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 84–93.
8. Стебаков И.Н., Попов С.Г., Корнаев А.В. Применение сверточных нейронных сетей для распознавания дефектов роторной системы. // XXXII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения: Сборник трудов конференции, Москва, 02–04 декабря 2020 года. – Москва: Федераль-

ное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2021. – С. 320-325.

9. Hamidi KE, Mjahed M, Kari AE, Ayad H. Adaptive Control Using Neural Networks and Approximate Models for Nonlinear Dynamic Systems. Modelling and Simulation in Engineering, 2020.

10. Leena N., Shanmugasundaram R. Artificial Neural Network Controller for Improved Performance of Brushless DC Motor. (EPSCICON) Computation and Controls Signals Power on Conference, January 2014.

#### Авторы:

Еремеев Николай Алексеевич, аспирант кафедры автоматизации и управления в технических системах Чувашского государственного университета. E-mail: nikoeremeev@mail.ru.

### ОБУЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРА ОТ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОТОРМОЖЕНИЯ

Дементий Ю.А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия  
Николаев К.П., ООО «Релематика», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

**Аннотация.** В работе показан способ обучения защиты генератора от однофазного замыкания на землю с применением модели классификации, используемой в машинном обучении. Разграничивающая модель (модель классификации) представляет собой линейную регрессию. Использование в качестве наблюдаемых величин напряжений реактора и нулевой последовательности «справа» третьей гармоники и частоты генератора позволяет полностью разграничить исследуемые режимы, и, следовательно, достичь максимально возможной точности классификации. Приведены полученные коэффициенты разграничивающей модели.

**Ключевые слова:** защита генератора, классификация режимов работы, линейный классификатор.

#### Введение

Наиболее частым видом замыкания в генераторе считается однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) в обмотке статора. Глав-

ная опасность ОЗЗ заключается в вероятности перехода в более сложные аварийные режимы, требующие отключения [1].

В работе [2] была показана возможность использования алгоритмов машинного обучения для целей релейной защиты, а именно для построения классификатора режимов работы объекта. В данной работе предлагается использовать линейную модель классификации для построения защиты генератора от ОЗЗ в режиме электроторможения.

### Задача

Постановка задачи во многом опирается на терминологию информационной теории релейной защиты [3]. Разграничению подлежат следующие режимы генератора в процессе электроторможения: режимы, в которых произошло ОЗЗ, ( $\alpha$ -режимы) и режимы, в которых не произошло никаких повреждений ( $\beta$ -режимы). Объект описывается имитационной моделью (ИМО), которая преобразует вектор объектных параметров модели  $x$  в вектор наблюдаемых величин  $v$ . Множества векторов объектных параметров  $G_\alpha$  и  $G_\beta$  отображаются имитационной моделью в множества  $S_\alpha$  и  $S_\beta$ , формируемые векторами наблюдаемых величин. Необходимо, используя имитационную модель объекта, а также допустимые диапазоны объектных параметров, построить классификатор, разделяющий  $\alpha$ - и  $\beta$ - режимы. Известно, что в общем случае области  $S_\alpha$  и  $S_\beta$  пересекаются, поэтому полученный классификатор должен удовлетворять требованиям гарантированной селективности (1) и максимальной чувствительности (2).

Формулировка требований в терминах машинного обучения:

$$TPR_p(a|S_\alpha, S_\beta) = 1, \quad (1)$$

где  $TPR$  – true positive rate или метрика полноты классификации, равная отношению количества верно распознанных альтернативных режимов к общему количеству альтернативных режимов;  $a$  – алгоритм классификации.

$$PPV_p(a|S_\alpha, S_\beta, TPR_p = 1) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $PPV$  – positive predictive value или метрика точности классификации, равная отношению количества верно распознанных

альтернативных режимов к количеству всех режимов, распознанных как альтернативные.

### Линейная модель

В качестве линейной модели классификации (3) выбрана логистическая регрессия [4]:

$$A(v) = \text{sign}(w^T v + w_0), \quad (3)$$

где  $w = [w_1, \dots, w_m]$  – вектор параметров разграничивающей модели;  $m$  – количество параметров;  $w_0$  – смещение разграничивающей модели (свободный член полинома).

### Объект исследования

В качестве объекта рассматривается генератор, заземлённый через дугогасящий реактор (ДГР). Схема замещения изображена на рис. 1.

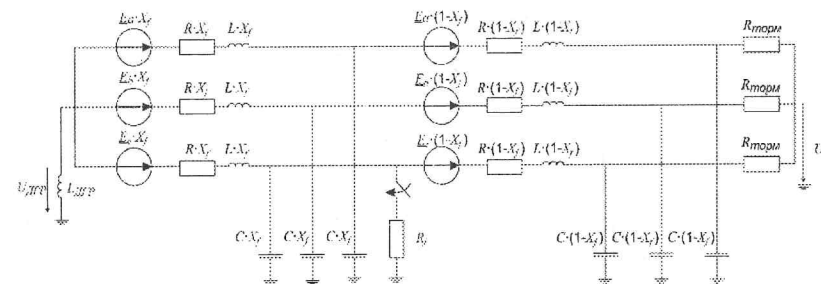


Рис. 1. Схема замещения генератора

Наблюдаются напряжение реактора и напряжение нулевой последовательности «справа». Вектор наблюдаемых величин содержит действительные и мнимые части напряжений реактора и нулевой последовательности «справа», приведённых к базовому вектору напряжения ДГР, и частоту генератора.

Генератор является источником возникновения не только основной, но и высших гармоник [5]. В работе [6] уже говорилось о возможности использования высших гармоник для создания защиты генератора от ОЗЗ. В этой работе используются значения напряжений третьей гармоники:

$$v = [\text{Re}(U_{\text{ДГР}}^{(3)}), \text{Re}(U_0^{(3)}), \text{Im}(U_0^{(3)}), \omega].$$

Для моделирования режимов на основе схем прямой, обратной и нулевой последовательностей составлена схема замещения генератора (рис. 2).

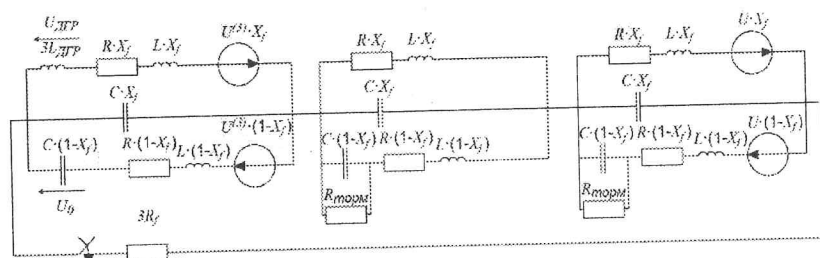


Рис. 2. Схема замещения генератора

Диапазоны варьируемых объектных параметров схемы замещения приведены в табл. 1:  $\omega$  – частота сети;  $R_f$  – переходное сопротивление,  $X_f$  – координата места замыкания;  $U$  – модуль фазного напряжения;  $R$ ,  $L$  – паразитные активное сопротивление и индуктивность обмоток генератора;  $C$  – поперечная паразитная ёмкость,  $V$  – расстройка компенсации ёмкостного тока сети;  $R_{\text{торм}}$  – резистивная нагрузка для электроторможения;  $U^{(3)}$  – модуль напряжения третьей гармоника. Для облегчения моделирования большого количества режимов индуктивность рассчитывается из значений расстройки компенсации, поперечной ёмкости для частоты 50 Гц.

Таблица 1

Параметры имитационной модели

Величина	Диапазон $\alpha$	Диапазон $\beta$
$X_f$ , о.е.	0.01 ... 0.99	
$\omega$ , рад/с	$2\pi \cdot 1$ ... $2\pi \cdot 50$	
$R$ , Ом	$10^{-6}$ ... $10^{-2}$	
$L$ , Гн	$10^{-6}$ ... $10^{-3}$	
$C$ , Ф	$4.08 \cdot 10^{-6}$ ... $4.08 \cdot 10^{-5}$	
$\vartheta$ , %	-5 ... 5	
$U$ , В	9093	
$U^{(3)}$ , В	50 ... 500	
$R_{\text{торм}}$ , Ом	$10^{-6}$	
$R_f$ , Ом	$10^{-6}$ ... 1	$10^8$

Согласно равномерному распределению сгенерирована выборка прецедентов, где прецедент – пара, включающая вектор наблюдаемых величин и тип режима ( $\alpha$ - или  $\beta$ -). В табл. 2 приведены значения коэффициентов разграничивающей модели и достигнутая точность классификации.

Достигнутая точность говорит о том, что области  $\alpha$ - и  $\beta$ -режимов не пересекаются, чего удалось достичь за счёт увеличения количества наблюдаемых величин.

Таблица 2

Результаты настройки параметров модели

Величина	Значение
$w_0$	-94024.858
$w_1$	1155.8392
$w_2$	4581.6746
$w_3$	-420088.36
$w_4$	1.9295
$TPR_{\beta}$	1.00
$PPV_{\beta}$	1.00

### Заключение

1. Линейная модель классификации позволяет реализовать селективную защиту генератора от ОЗЗ в режиме электроторможения с максимальной чувствительностью. Преимуществами модели являются простота её реализации, и инвариантность к размерности наблюдаемого пространства.

2. Использование указанных в работе наблюдаемых величин позволяет достигнуть полного разграничения областей  $\alpha$ - и  $\beta$ -режимов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вайнштейн Р.А. Защита от замыканий на землю генераторов и сетей среднего напряжения на основе использования низкочастотных составляющих токов нулевой последовательности: специальность



05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Вайнштейн Р.А. – Томск, 2011. – 45 с.

2. Дементий Ю.А. Активное обучение интеллектуальной релейной защиты. Противостоящие режимы / Ю.А. Дементий // Электрические станции. – 2021. – № 9(1082). – С. 45–53.

3. Лямец Ю.Я. Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. Часть 1. Граничные условия и обучающие процедуры / Лямец Ю.Я., Кержаев Д.В., Нудельман Г.С., Романов Ю.В. // Известия вузов. Электромеханика – 2009. – С. 24–30.

4. Varpiñk V., The nature of statistical learning theory // Springer, New York, NY; 1st edition – 2000. – 314 p.

5. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт – 2011 – 767 с.

6. Солдатов А.В. Информационный базис защиты генератора от однофазных замыканий статора на землю с контролем высших гармоник дифференциального тока / Солдатов А.В., Антонов В.И., Наумов В.А., Иванов Н.Г., Александрова М.И. // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 3(24). – С. 12–20.

**Авторы:**

**Дементий Юрий Анатольевич**, кандидат технических наук, руководитель группы ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного университета в 2015 году. В 2018 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях». E-mail: dementiu.yu.a@gmail.com

**Николаев Кирилл Петрович**, студент факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», техник-исследователь ООО «Релематика». E-mail: nikolaev.kirill.p@mail.ru.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВ НАГРУЗКИ ПРИ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ЧАСТОТЫ И НАПРЯЖЕНИЯ

**Воронов П.Л., Ермолаева Н.М., Кокорев Н.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия**

**Аннотация.** В статье приводятся аналитические характеристики синхронных двигателей при одновременном изменении частоты и напряжения в питающей системе электроснабжения.

**Ключевые слова:** частота, напряжение, синхронный двигатель, устойчивость узла нагрузки.

В последние годы во многих странах в связи с происшедшими системными авариями резко повысилось внимание и научный интерес к совершенствованию устройств и их правильного и обоснованного применения к автоматической частотной разгрузки (АЧР) как при снижении частоты, так и при её подъёме с целью восстановления нормальной работы систем электроснабжения (СЭС). Помимо непосредственного применения АЧР комплексно проводятся и другие мероприятия: частотный пуск резервных агрегатов, перевод гидрогенераторов из режима синхронных компенсаторов в режим выдачи активной мощности, а также целенаправленное и своевременное включение ЧАПВ и АПВ различных ЛЭП и систем АВР. На практике заметно возросла вероятность местных, локальных дефицитов мощности при широком использовании распределённой генерации, а также в связи с участвовавшими отключениями длинных ЛЭП, появились проблемы сохранения устойчивости работы систем, имеющих избыток генерируемой мощности. Наблюдались случаи необоснованного отключения генераторов, приводящие к аварийным ситуациям с понижением частоты.

Заметим, что режимы, связанные с возникновением снижения частоты из-за дефицита генерации активной мощности, как правило, сопровождаются и одновременным изменением напряжения в узлах нагрузки. Только зная состав и параметры различных потребителей, можно определить достаточно точно характеристики активной и реактивной мощности каждого из