

## *СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ*

**Б.А. КОРОБЕЙНИКОВ, Г.А. ЗАХАРОВ, Д.И. СИДОРОВ, Н.В. ТОПОРКОВ**

*Кубанский государственный технологический университет  
350072, Российская федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;  
электронная почта: d.i.sidoroff@gmail.com*

Генераторы являются наиболее важным и ответственным оборудованием электроэнергетических установок и системы электроснабжения. По этой причине к релейной защите генераторов предъявляются особенно жесткие требования. В данной работе представлена структурная схема и математическая модель релейной защиты генератора мощностью до 1 МВт на основе преобразователя с вращающимся магнитным полем.

**Ключевые слова:** преобразователь с вращающимся магнитным полем, синхронный генератор, релейная защита.

Короткие замыкания в системах электроснабжения нарушают нормальную работу энергосистемы и потребителей электроэнергии. Они сопровождаются значительным увеличением тока и понижением напряжения в элементах энергосистемы. При коротких замыканиях, ЭДС генератора замыкается через относительно малое сопротивление генераторов, трансформаторов и линий. В контуре замкнутой накоротко ЭДС возникает большой ток, называемый током короткого замыкания. Одновременно во всех точках сети происходит снижение напряжения, наибольшее в точке короткого замыкания.

Ненормальные режимы создают возможность возникновения повреждений или расстройства работы энергосистемы. Обычно они приводят к отклонению величин напряжения, тока и частоты от допустимых значений, опасные для оборудования или устойчивой работы энергосистемы. К ним относятся: перегрузка оборудования, качания в энергосистеме и повышение напряжения сверх допустимого значения.

При возникновении повреждений защита выявляет и отключает от системы поврежденный участок, воздействуя на специальные силовые выключатели, предназначенные для размыкания токов повреждения.

В соответствии с Правилами устройства электроустановок, генераторы мощностью до 1 МВт должны защищаться от следующих видов повреждений:

- многофазных замыканий в обмотке и на выводах;
- однофазных замыканий в обмотке статора;
- двойных замыканий на землю;
- внешних коротких замыканий;
- симметричной перегрузки обмотки статора.

В настоящее время широкое применение в России и за рубежом имеют дистанционные защиты, основанные на применении микропроцессорной техники. Однако, несмотря на технические и информационные достоинства микропроцессорных защит, их использование связано с рядом проблем. Так же существует проблема электромагнитной совместимости - микропроцессорные устройства сильно подвержены влиянию электромагнитных полей на подстанциях.

Таким образом, совершенствование защиты генераторов малой мощности на основе использования новых устройств является актуальной задачей.

На рисунке 1 представлена общая схема устройства, работающего на преобразователях с вращающимся магнитным полем [1].

Логическая часть устройства может быть выполнена с использованием электромеханической или микропроцессорной элементной базы, а так же комбинированной, что повысит надежность защиты в целом.

Поясняющая схема

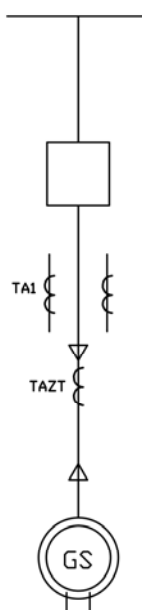


Схема цепей переменного тока

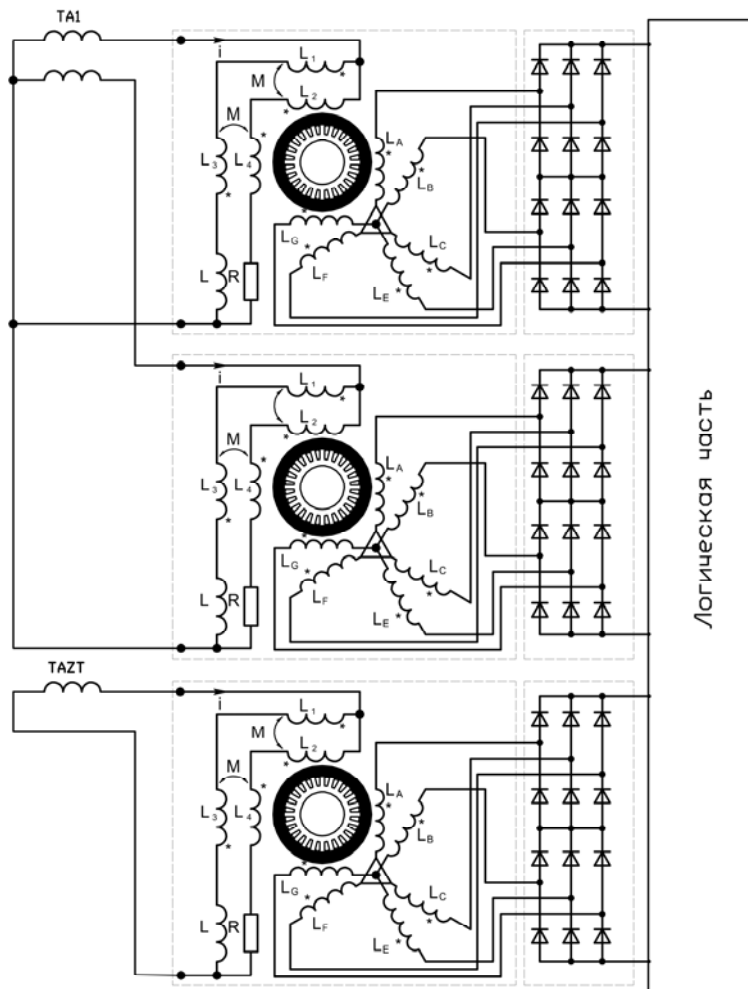


Рисунок 1 – Схема защиты синхронного генератора мощностью до 1 МВт.

Представленная защита включает три многофазных измерительных преобразователя (МИП) [1] два из которых включаются на фазные токи генератора и служат для работы защит от многофазных замыканий в обмотке и на выводах, внешних коротких замыканий, симметричной перегрузки обмотки статора. Третий МИП подключается к трансформатору тока нулевой последовательности и служит для защиты от замыканий на землю и двойных замыканий на землю.

Для моделирования устройства в среде Simulink необходимо составить систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 JR_B &= (L_1 + L_3 + L_B) \frac{di_1}{dt} + (R_1 + R_3 + R_B) i_1 - (M_{12} + M_{34}) \frac{di_2}{dt} + R_B i_2 + (M_{1a} + M_{3a}) \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ (M_{1b} + M_{3b}) \frac{di_b}{dt} + (M_{1c} + M_{3c}) \frac{di_c}{dt} + (M_{1d} + M_{3d}) \frac{di_d}{dt} + (M_{1e} + M_{3e}) \frac{di_e}{dt} + (M_{1f} + M_{3f}) \frac{di_f}{dt}; \\
 JR_B &= (L_2 + L_4) \frac{di_2}{dt} + (R_2 + R_4 + R_B + R_B) i_2 - (M_{12} + M_{34}) \frac{di_1}{dt} + R_B i_1 + (M_{2a} + M_{4a}) \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ (M_{2b} + M_{4b}) \frac{di_b}{dt} + (M_{2c} + M_{4c}) \frac{di_c}{dt} + (M_{2d} + M_{4d}) \frac{di_d}{dt} + (M_{2e} + M_{4e}) \frac{di_e}{dt} + (M_{2f} + M_{4f}) \frac{di_f}{dt};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JR_B &= (L_1 + L_3 + L_B) \frac{di_1}{dt} + (R_1 + R_3 + R_B) i_1 - (M_{12} + M_{34}) \frac{di_2}{dt} + R_B i_2 + (M_{1a} + M_{3a}) \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ (M_{1b} + M_{3b}) \frac{di_b}{dt} + (M_{1c} + M_{3c}) \frac{di_c}{dt} + (M_{1d} + M_{3d}) \frac{di_d}{dt} + (M_{1e} + M_{3e}) \frac{di_e}{dt} + (M_{1f} + M_{3f}) \frac{di_f}{dt}; \\
 JR_B &= (L_2 + L_4) \frac{di_2}{dt} + (R_2 + R_4 + R_B + R_B) i_2 - (M_{12} + M_{34}) \frac{di_1}{dt} + R_B i_1 + (M_{2a} + M_{4a}) \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ (M_{2b} + M_{4b}) \frac{di_b}{dt} + (M_{2c} + M_{4c}) \frac{di_c}{dt} + (M_{2d} + M_{4d}) \frac{di_d}{dt} + (M_{2e} + M_{4e}) \frac{di_e}{dt} + (M_{2f} + M_{4f}) \frac{di_f}{dt};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JR_B &= (L_1 + L_3 + L_B) \frac{di_1}{dt} + (R_1 + R_3 + R_B) i_1 - (M_{12} + M_{34}) \frac{di_2}{dt} + R_B i_2 + (M_{1a} + M_{3a}) \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ (M_{1b} + M_{3b}) \frac{di_b}{dt} + (M_{1c} + M_{3c}) \frac{di_c}{dt} + (M_{1d} + M_{3d}) \frac{di_d}{dt} + (M_{1e} + M_{3e}) \frac{di_e}{dt} + (M_{1f} + M_{3f}) \frac{di_f}{dt}; \\
 JR_B &= (L_2 + L_4) \frac{di_2}{dt} + (R_2 + R_4 + R_B + R_B) i_2 - (M_{12} + M_{34}) \frac{di_1}{dt} + R_B i_1 + (M_{2a} + M_{4a}) \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ (M_{2b} + M_{4b}) \frac{di_b}{dt} + (M_{2c} + M_{4c}) \frac{di_c}{dt} + (M_{2d} + M_{4d}) \frac{di_d}{dt} + (M_{2e} + M_{4e}) \frac{di_e}{dt} + (M_{2f} + M_{4f}) \frac{di_f}{dt};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 &= L_a \frac{di_a}{dt} + (R_a + R_{Ha}) i_a + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1a} + M_{3a}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2a} + M_{4a}) \frac{di_2}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + \\
 &+ M_{ac} \frac{di_c}{dt} + M_{ad} \frac{di_d}{dt} + M_{ae} \frac{di_e}{dt} + M_{af} \frac{di_f}{dt};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 &= L_b \frac{di_b}{dt} + (R_b + R_{Hb}) i_b + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1b} + M_{3b}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2b} + M_{4b}) \frac{di_2}{dt} + M_{ba} \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ M_{bc} \frac{di_c}{dt} + M_{bd} \frac{di_d}{dt} + M_{be} \frac{di_e}{dt} + M_{bf} \frac{di_f}{dt};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 &= L_c \frac{di_c}{dt} + (R_c + R_{Hc}) i_c + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1c} + M_{3c}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2c} + M_{4c}) \frac{di_2}{dt} + M_{ca} \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ M_{cb} \frac{di_b}{dt} + M_{cd} \frac{di_d}{dt} + M_{ce} \frac{di_e}{dt} + M_{cf} \frac{di_f}{dt};
 \end{aligned}$$

$$0 = L_d \frac{di_d}{dt} + (R_d + R_{Hd})i_d + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1d} + M_{3d}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2d} + M_{4d}) \frac{di_2}{dt} + M_{da} \frac{di_a}{dt} + M_{db} \frac{di_b}{dt} + M_{dc} \frac{di_c}{dt} + M_{de} \frac{di_e}{dt} + M_{df} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_e \frac{di_e}{dt} + (R_e + R_{He})i_e + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1e} + M_{3e}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2e} + M_{4e}) \frac{di_2}{dt} + M_{ea} \frac{di_a}{dt} + M_{eb} \frac{di_b}{dt} + M_{ec} \frac{di_c}{dt} + M_{ed} \frac{di_d}{dt} + M_{ef} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_f \frac{di_f}{dt} + (R_f + R_{Hf})i_f + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1f} + M_{3f}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2f} + M_{4f}) \frac{di_2}{dt} + M_{fa} \frac{di_a}{dt} + M_{fb} \frac{di_b}{dt} + M_{fc} \frac{di_c}{dt} + M_{fd} \frac{di_d}{dt} + M_{fe} \frac{di_e}{dt};$$

$$0 = L_a \frac{di_a}{dt} + (R_a + R_{Ha})i_a + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1a} + M_{3a}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2a} + M_{4a}) \frac{di_2}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_c}{dt} + M_{ad} \frac{di_d}{dt} + M_{ae} \frac{di_e}{dt} + M_{af} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_b \frac{di_b}{dt} + (R_b + R_{Hb})i_b + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1b} + M_{3b}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2b} + M_{4b}) \frac{di_2}{dt} + M_{ba} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_c}{dt} + M_{bd} \frac{di_d}{dt} + M_{be} \frac{di_e}{dt} + M_{bf} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_c \frac{di_c}{dt} + (R_c + R_{Hc})i_c + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1c} + M_{3c}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2c} + M_{4c}) \frac{di_2}{dt} + M_{ca} \frac{di_a}{dt} + M_{cb} \frac{di_b}{dt} + M_{cd} \frac{di_d}{dt} + M_{ce} \frac{di_e}{dt} + M_{cf} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_d \frac{di_d}{dt} + (R_d + R_{Hd})i_d + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1d} + M_{3d}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2d} + M_{4d}) \frac{di_2}{dt} + M_{da} \frac{di_a}{dt} + M_{db} \frac{di_b}{dt} + M_{dc} \frac{di_c}{dt} + M_{de} \frac{di_e}{dt} + M_{df} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_e \frac{di_e}{dt} + (R_e + R_{He})i_e + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1e} + M_{3e}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2e} + M_{4e}) \frac{di_2}{dt} + M_{ea} \frac{di_a}{dt} + M_{eb} \frac{di_b}{dt} + M_{ec} \frac{di_c}{dt} + M_{ed} \frac{di_d}{dt} + M_{ef} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_f \frac{di_f}{dt} + (R_f + R_{Hf})i_f + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1f} + M_{3f}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2f} + M_{4f}) \frac{di_2}{dt} + M_{fa} \frac{di_a}{dt} + M_{fb} \frac{di_b}{dt} + M_{fc} \frac{di_c}{dt} + M_{fd} \frac{di_d}{dt} + M_{fe} \frac{di_e}{dt}.$$

$$0 = L_a \frac{di_a}{dt} + (R_a + R_{Ha})i_a + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1a} + M_{3a}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2a} + M_{4a}) \frac{di_2}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_c}{dt} + M_{ad} \frac{di_d}{dt} + M_{ae} \frac{di_e}{dt} + M_{af} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_b \frac{di_b}{dt} + (R_b + R_{Hb})i_b + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1b} + M_{3b}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2b} + M_{4b}) \frac{di_2}{dt} + M_{ba} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_c}{dt} + M_{bd} \frac{di_d}{dt} + M_{be} \frac{di_e}{dt} + M_{bf} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_c \frac{di_c}{dt} + (R_c + R_{Hc})i_c + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1c} + M_{3c}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2c} + M_{4c}) \frac{di_2}{dt} + M_{ca} \frac{di_a}{dt} + M_{cb} \frac{di_b}{dt} + M_{cd} \frac{di_d}{dt} + M_{ce} \frac{di_e}{dt} + M_{cf} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_d \frac{di_d}{dt} + (R_d + R_{Hd})i_d + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1d} + M_{3d}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2d} + M_{4d}) \frac{di_2}{dt} + M_{da} \frac{di_a}{dt} + M_{db} \frac{di_b}{dt} + M_{dc} \frac{di_c}{dt} + M_{de} \frac{di_e}{dt} + M_{df} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_e \frac{di_e}{dt} + (R_e + R_{He})i_e + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1e} + M_{3e}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2e} + M_{4e}) \frac{di_2}{dt} + M_{ea} \frac{di_a}{dt} + M_{eb} \frac{di_b}{dt} + M_{ec} \frac{di_c}{dt} + M_{ed} \frac{di_d}{dt} + M_{ef} \frac{di_f}{dt};$$

$$0 = L_f \frac{di_f}{dt} + (R_f + R_{Hf})i_f + R_{III} \cdot i_0 + (M_{1f} + M_{3f}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2f} + M_{4f}) \frac{di_2}{dt} + M_{fa} \frac{di_a}{dt} + M_{fb} \frac{di_b}{dt} + M_{fc} \frac{di_c}{dt} + M_{fd} \frac{di_d}{dt} + M_{fe} \frac{di_e}{dt}.$$

Записанная система линейных дифференциальных уравнений решается при помощи метода пространства состояний. Для этого в Simulink есть специальный объект – State-space.

Блок создает динамический объект, описываемый уравнениями в пространстве состояний:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \right\}$$

где

$x$  – вектор состояния,

$u$  – вектор входных воздействий,

$y$  – вектор выходных сигналов,

$A, B, C, D$  - матрицы: системы, входа, выхода и обхода, соответственно.

Матрицы системы можно записать из дифференциальных уравнений, подставив цифровые значения параметров элементов схемы:

$A =$

$1.0e+007 *$

-0.0000	-0.0000	0.0800	0.0560	-0.0632	-0.0827	-0.0169	0.0267
-0.0001	-0.0051	-3.1261	0.4321	7.0007	5.8467	-3.8746	-6.2788
-0.0000	-0.0003	-8.1569	3.4455	-1.5302	-3.0480	-2.2188	-0.3976
0.0000	0.0000	3.4455	-7.9586	-0.0540	-2.0204	-3.3915	-1.9269
0.0000	0.0007	-1.5302	-0.0540	-8.9391	2.5964	-1.4367	-2.5424
0.0000	0.0006	-3.0480	-2.0204	2.5964	-8.6472	0.4516	-1.2383
-0.0000	-0.0004	-2.2188	-3.3915	-1.4367	0.4516	-8.2505	2.9400
-0.0000	-0.0006	-0.3976	-1.9269	-2.5424	-1.2383	2.9400	-8.7407

$B =$

$1.0e+003 *$

0.0708	0.0141	-0.0080	-0.0056	0.0063	0.0083	0.0017	-0.0027
0.0141	5.0070	0.3126	-0.0432	-0.7000	-0.5846	0.3874	0.6278
-0.0080	0.3126	0.8156	-0.3445	0.1530	0.3048	0.2219	0.0398
-0.0056	-0.0432	-0.3445	0.7958	0.0054	0.2020	0.3391	0.1927
0.0063	-0.7000	0.1530	0.0054	0.8938	-0.2596	0.1437	0.2542
0.0083	-0.5846	0.3048	0.2020	-0.2596	0.8646	-0.0452	0.1238
0.0017	0.3874	0.2219	0.3391	0.1437	-0.0452	0.8250	-0.2940
-0.0027	0.6278	0.0398	0.1927	0.2542	0.1238	-0.2940	0.8740

C =

1	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1

D =

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Для детального изучения особенностей поведения предлагаемого комплекта защит при различных режимах работы, в среде Simulink программы MATLAB была создана модель его измерительной и логической частей. Схема выполнена преимущественно с помощью стандартных блоков библиотеки SimPowerSystems и отражает работу комплекта защиты в условиях развития аварийных ситуаций.

На рисунках 2 и 3 приведена структурная схема модели предлагаемого комплекта защит в среде Simulink.



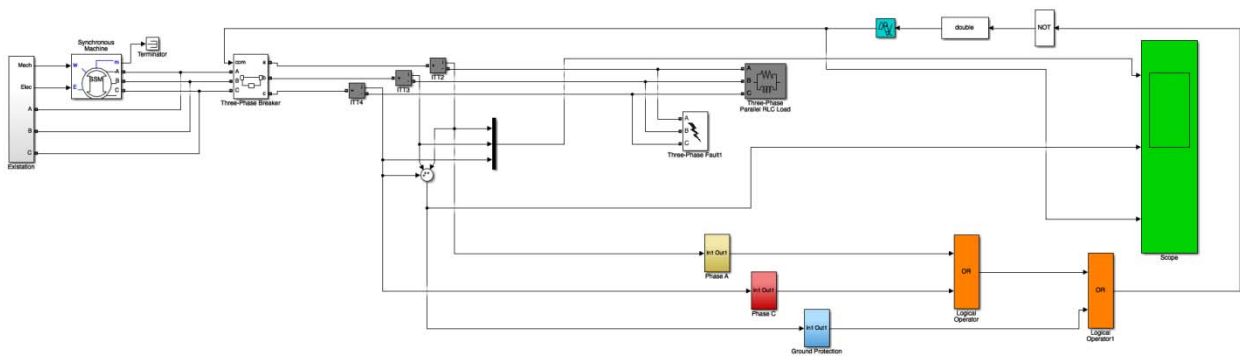


Рисунок 2 – Структурная схема модели комплекта защит

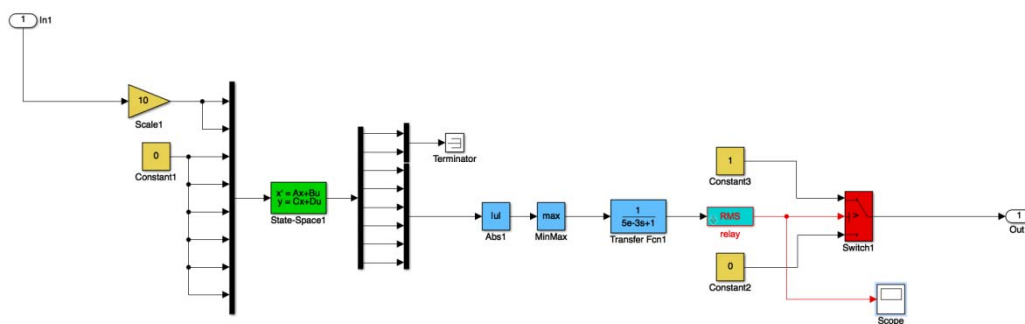


Рисунок 3 – Структурная схема измерительной части комплекта защиты

Для проверки работы схемы было произведено построение временных диаграмм срабатывания для двух аварийных ситуаций: междуфазного короткого замыкания (рисунок 4) и однофазного замыкания на землю (рисунок 5). Диаграммах работы представлены следующие величины (сверху вниз): фазные токи, ток нулевой последовательности, сигнал срабатывания защиты. В качестве защищаемого генератора была взята модель серийно выпускаемой машины ГС-600-1500 УХЛ2 со следующими параметрами:  $P = 600 \text{ кВт}$ ,  $S = 750 \text{ кВА}$ ,  $u = 6,3 \text{ кВ}$ . Генераторы данного типа выпускаются заводом «Электротяжмаш-Привод», г. Лысьва.

Из диаграмм видно, что время работы защиты соответствует выставленной уставке срабатывания – 0,3 с.

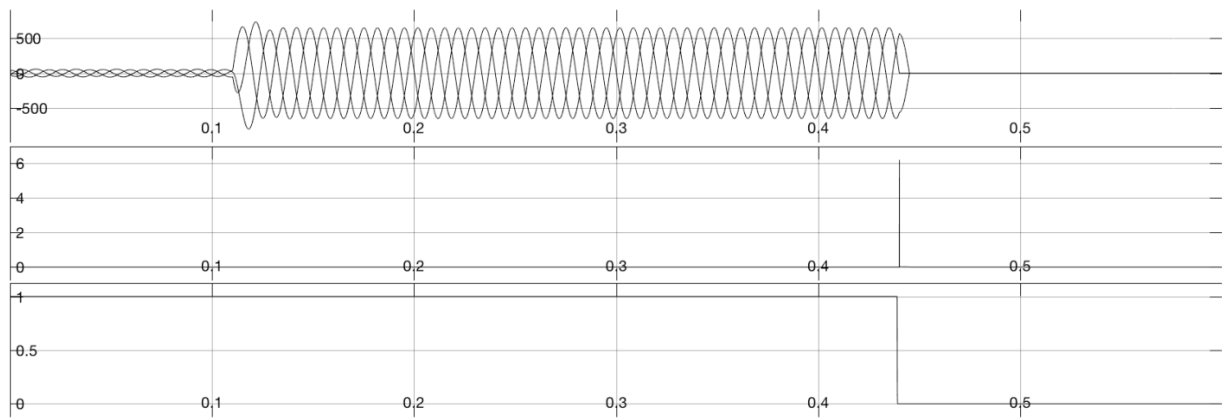


Рисунок 4 – Временная диаграмма работы комплекта защиты при междуфазном замыкании

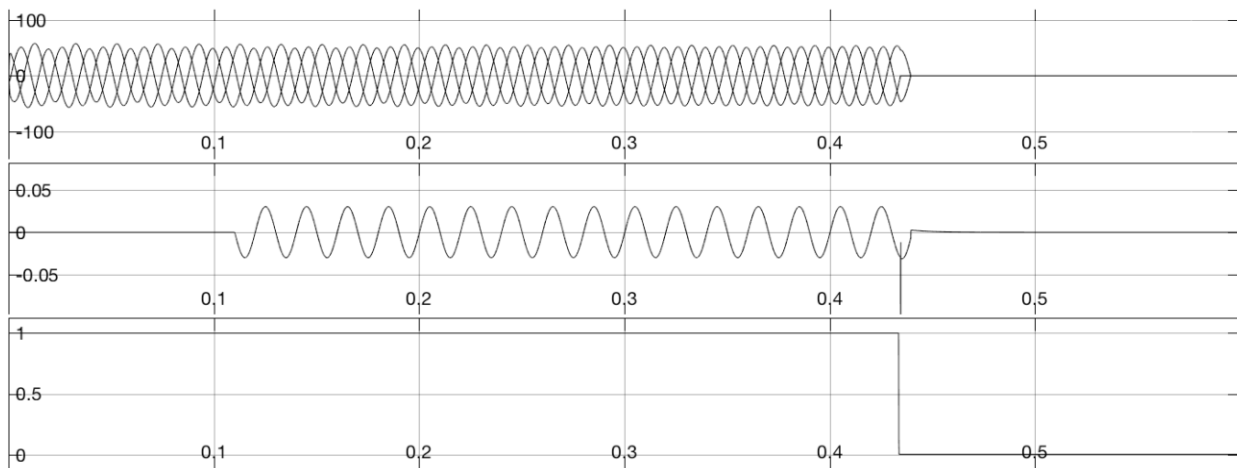


Рисунок 5 – Временная диаграмма работы комплекта защиты при однофазном замыкании на землю

В результате работы была создана и исследована математическая модель комплекта защит синхронного генератора мощностью до 1 МВт. Моделирование в среде MATLAB показало принципиальную работоспособность комплекта защит генератора на основе многофазного измерительного преобразователя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2333562 РФ. Однофазный трансформатор вращающегося поля / Коробейников Б.А., Сидоров Д.И. (РФ), 2007. – 5 с.

2. Б.А. Коробейников Совершенствование комплекта основных защит трансформатора мощностью до 6,3 МВА на основе многофазного преобразователя тока/ Д.И. Сидоров, А.А. Ноговицын, С.П. Пелипенко// Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ», №11, 2017

3. Сидоров, Д.И. Определение параметров однофазного трансформатора с вращающимся полем без учета активных сопротивлений обмоток [Текст]/ Б.А. Коробейников, А.И. Ищенко, Д.И. Сидоров, В.М. Радионов//Электроэнергетические комплексы и системы. Сборник научных статей, – 2008. С. 8-11.

#### REFERENCES

1. Pat. 2333562 RF. Odnofaznyy transformator vrashchayushchegosya polya / Korobeynikov B.A., Sidorov D.I. (RF), 2007. – 5 s.

2. B.A. Korobeynikov Sovershenstvovanie komplekta osnovnykh zashchit transformatora moshchnostyu do 6,3 MVA na osnove mnogofaznogo preobrazovatelya toka/ D.I. Sidorov, A.A. Nogovitsyn, S.P. Pelipenko// Elektronnyy setevoy politematicheskiy zhurnal «Nauchnye trudy KubGTU», №11, 2017

3. Sidorov, D.I. Opredelenie parametrov odnofaznogo transformatora s vrashchayushchimsya polem bez ucheta aktivnykh soprotivleniy obmotok [Tekst]/ B.A. Korobeynikov, A.I. Ishchenko, D.I. Sidorov, V.M. Radionov//Elektroenergeticheskie komplekсы i sistemy. Sbornik nauchnykh statey, – 2008. S. 8-11

#### *IMPROVEMENT OF RELAY PROTECTION OF LOW POWER GENERATORS IN ISLAND ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS*

**B.A. KOROBEINIKOV, G.A. ZAKHAROV, D.I. SIDOROV, N.V. TOPORKOV**

*Kuban State Technological University  
2, Moscovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072;  
e-mail: d.i.sidoroff@gmail.com*

Generators are the most important and responsible equipment of electric power plants and power supply system. For this reason, particularly stringent requirements are imposed on the relay protection of generators. In this paper, we present a block diagram and a mathematical model of relay protection of a generator up to 1 MW on the basis of a converter with a rotating magnetic field.

**Keywords:** converter with rotating magnetic field, synchronous generator, relay protection.