

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

«Результаты численного моделирования
аварийных переходных процессов при высоковольтном пробое изоляции
компонентов системы электропитания ITER на землю»

к Техническому заданию № ИТЭР-1343-15

на опытно-конструкторскую работу
«Доработка комплекса измерения электрических параметров
системы управления электропитанием сверхпроводящих катушек
магнитной системы ИТЭР для применения в системах
оперативной коммутации тока и заземления»

Введение

Разрабатываемый в рамках данной работы комплекс защиты будет установлен на изоляционной платформе и соединен с заземляющим резистором ER1 (см. рисунок). На рисунке приведена упрощенная электрическая схема заземляющего устройства с обозначением места расположения разрабатываемого комплекса защиты. Все приведенные ниже результаты расчетов содержат кривые тока в резисторе ER1 в различных режимах работы системы питания магнитных катушек.

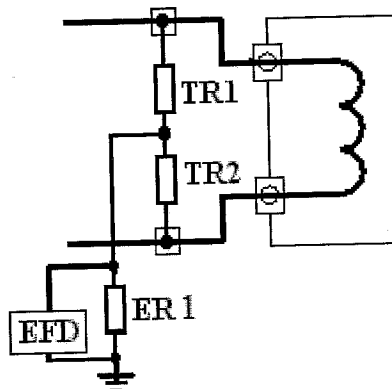


Рис. Упрощенная электрическая схема устройства заземления, где: ER1 – заземляющий резистор 1 кОм, EFD - разрабатываемый комплекс защиты.

Переходные процессы в системе заземления обмоток CS1

1. Работа в установившемся режиме

Приводятся результаты расчетов для следующих сценариев работы:

1. Максимальное напряжение на обмотке ($\alpha=15^\circ$) при токах обмоток - 45 кА
2. Нулевое напряжение на обмотке ($\alpha=90^\circ$) при токах обмоток 45 кА
3. Минимальное напряжение на обмотке ($\alpha=135^\circ$) при токах обмоток 45 кА
4. Максимальное напряжение на обмотке ($\alpha=15^\circ$) при токах обмоток 13.5 кА
5. Нулевое напряжение на обмотке ($\alpha=90^\circ$) при токах обмоток 13.5 кА
6. Минимальное напряжение на обмотке ($\alpha=135^\circ$) при токах обмоток 13.5 кА
7. Срабатывание устройства FDU с начальным током обмоток - 45 кА
8. Срабатывание устройства SNU ($\alpha=135^\circ$) с начальным током обмоток - 5 кА

В таблице приведены амплитудные значения токов на резисторе ER1 (рис. 1.) для каждого из сценариев работы.

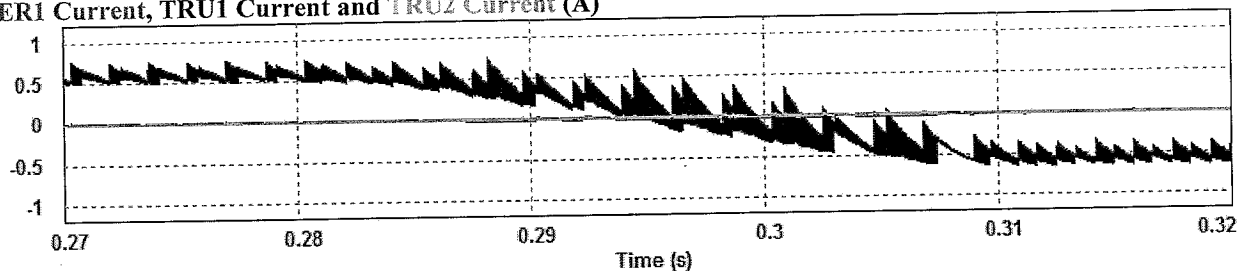
Сценарий	1	2	3	4	5	6	7	8
Амплитудное значение тока на заземляющем резисторе ER1	0.02 A	0.048 A	0.028 A	0.014 A	0.033 A	0.035 A	0.066 A	-1.29 A

Для каждого из сценариев смоделированы следующие два переходных процесса:

- Первый – это 30 мс спада и α варьируется от 15° до 135°
- Второй – это 15 мс нарастания и α варьируется от 90° до 15°

Сценарий 1

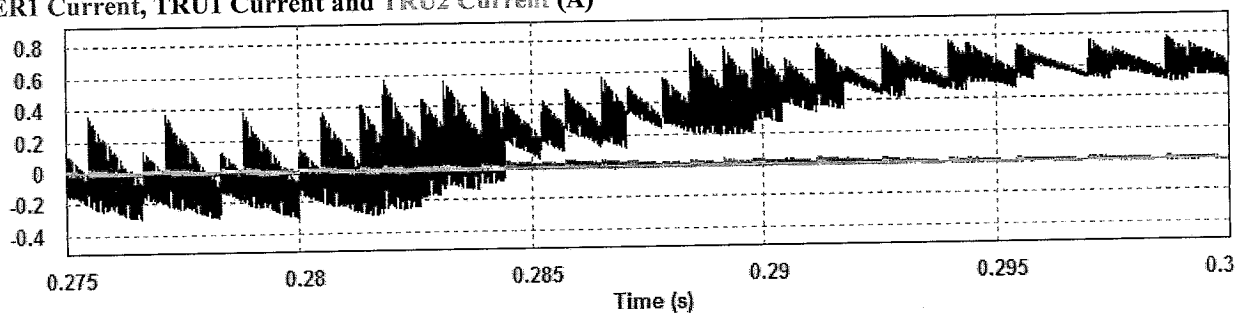
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Ток заземляющего резистора от -0.039 A до 0.045 A

Сценарий 2

ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Ток заземляющего резистора от -0.025 A до 0.05 A

2. Пробой преобразователя на землю со стороны переменного тока

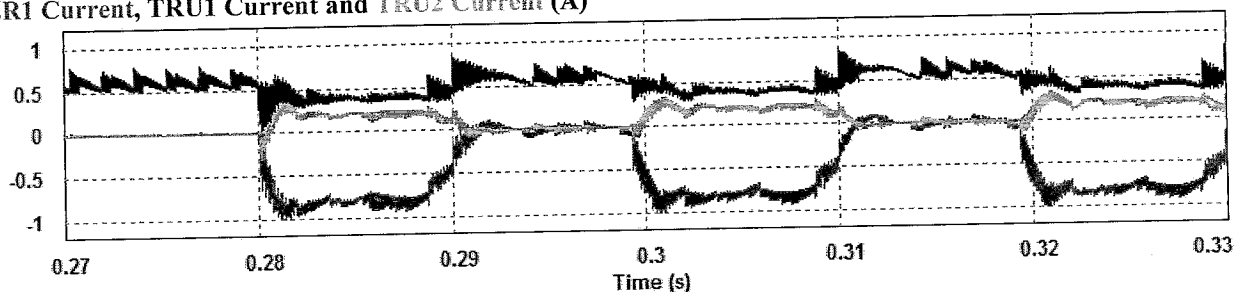
Смоделировано три сценария:

1. Максимальное напряжение на обмотке ($\alpha=15^\circ$) при токе обмотки 45 кА (сценарий 1);
2. Нулевое напряжение на обмотке ($\alpha=90^\circ$) при токе обмотки 45 кА (сценарий 2);
3. Минимальное напряжение на обмотке ($\alpha=135^\circ$) при токе обмотки 45 кА (сценарий 3).

Пробой на землю происходит при $t=0,28$ с

Сценарий 1

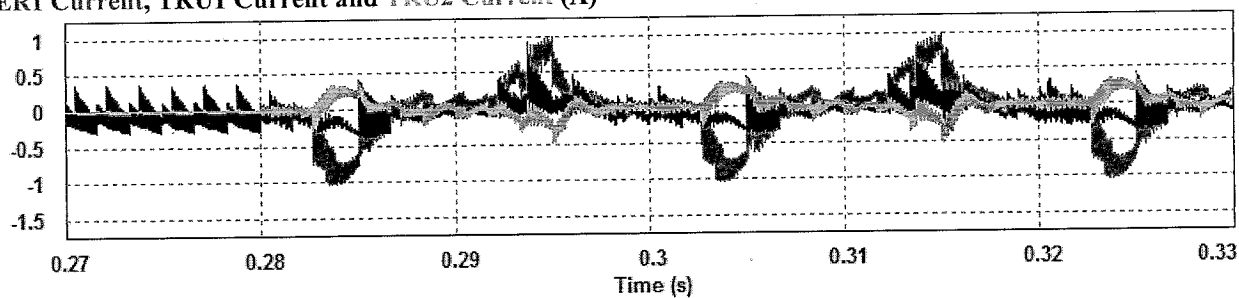
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Значение макс. тока равняется -1 A для заземляющего резистора. Диапазон по току 1.15 A

Сценарий 2

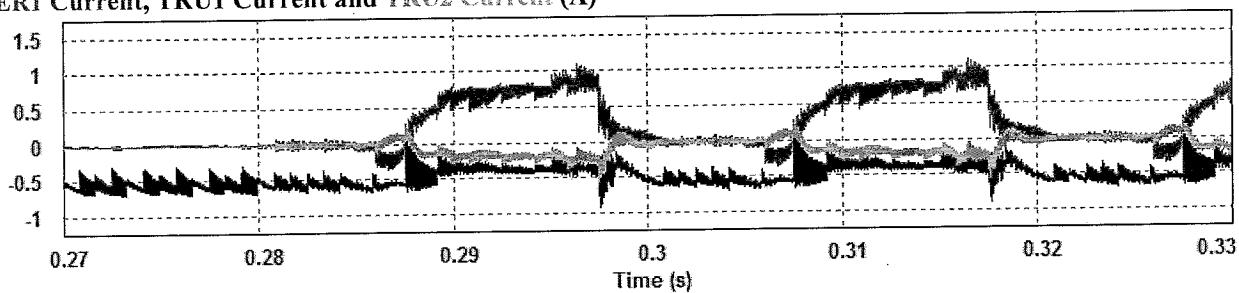
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Диапазон по току заземляющего резистора - 2.04A

Сценарий 3

ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Диапазон по току заземляющего резистора 1.5 A

3. Замыкание на землю одного полюса преобразователя на стороне постоянного тока

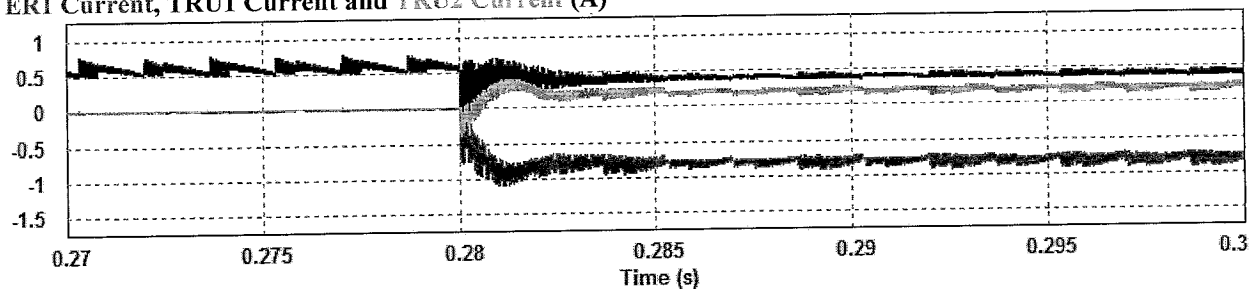
Смоделировано три сценария:

1. Максимальное напряжение на обмотке ($\alpha=15^\circ$) при токе обмотки 45 кА (сценарий 1);
2. Нулевое напряжение на обмотке ($\alpha=90^\circ$) при токе обмотки 45 кА (сценарий 2);
3. Минимальное напряжение на обмотке ($\alpha=135^\circ$) при токе обмотки 45 кА (сценарий 3).

Пробой на землю происходит при $t=0,28$ с

Сценарий 1

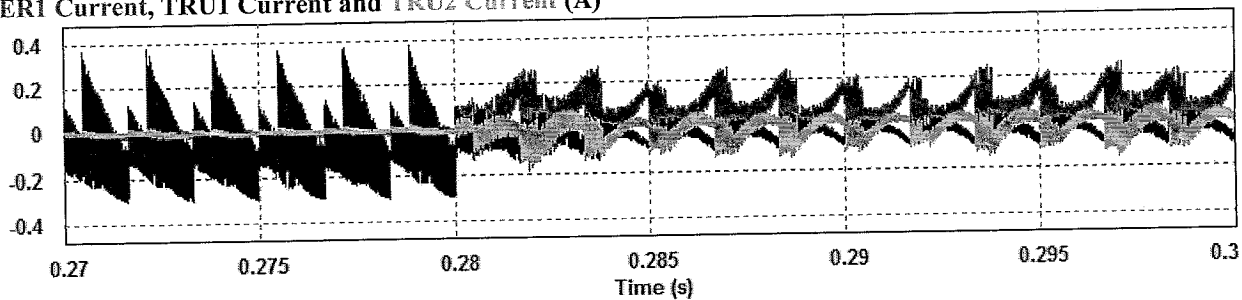
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 1.09 A

Сценарий 2

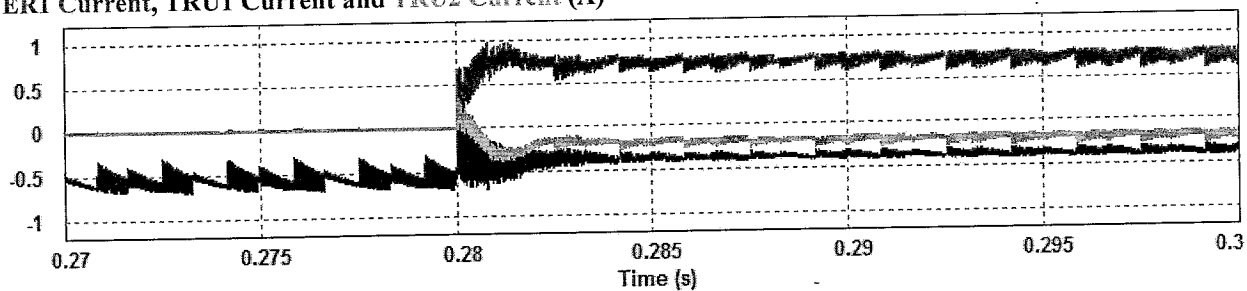
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 0.27 A.

Сценарий 3

ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 0.97 A.

4. Замыкание на землю в соединениях средней точки конвертеров

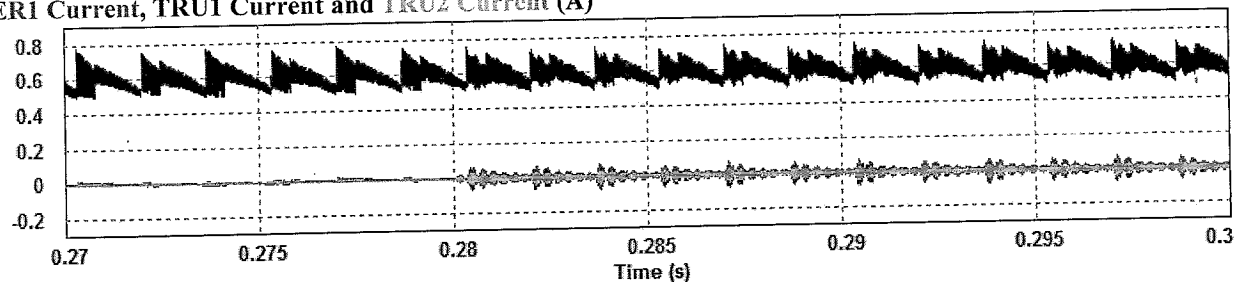
Смоделировано три сценария:

1. Максимальное напряжение на обмотке ($\alpha=15^\circ$) при токе обмотки 45 кА (сценарий 1);
2. Нулевое напряжение на обмотке ($\alpha=90^\circ$) при токе обмотки 45 кА (сценарий 2);
3. Минимальное напряжение на обмотке ($\alpha=135^\circ$) при токе обмотки 45 кА (сценарий 3).

Пробой на землю происходит при $t=0,28$ с

Сценарий 1

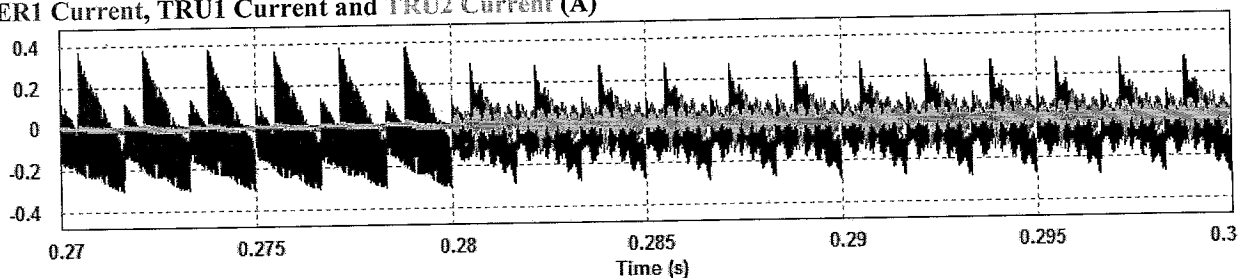
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 0.07 A

Сценарий 2

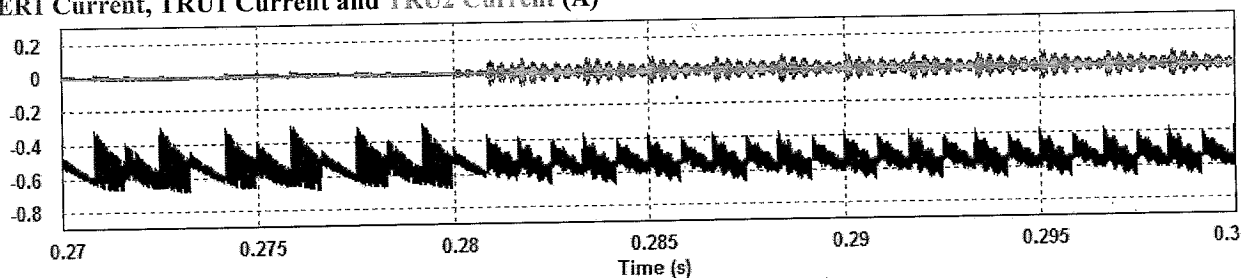
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 0.15 A.

Сценарий 3

ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 0.086 A.

5. Пробой на землю положительного вывода сверхпроводящей катушки

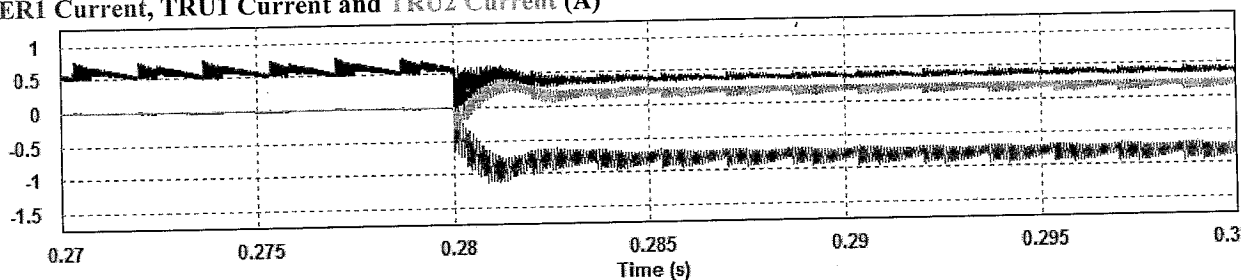
Смоделировано три сценария:

1. Максимальное напряжение на обмотке ($\alpha=15^\circ$) (сценарий 1)
2. Нулевое напряжение на обмотке ($\alpha=90^\circ$) (сценарий 2)
3. Минимальное напряжение на обмотке ($\alpha=135^\circ$) (сценарий 3)

Пробой на землю происходит при $t = 0,28$ с.

Сценарий 1

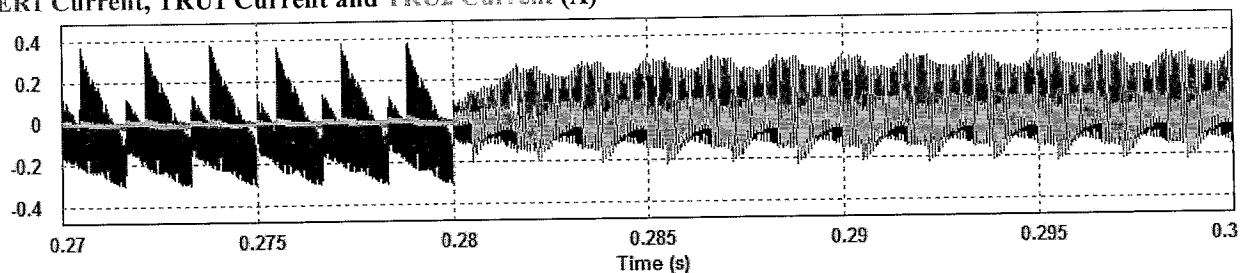
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 1.12 A.

Сценарий 2

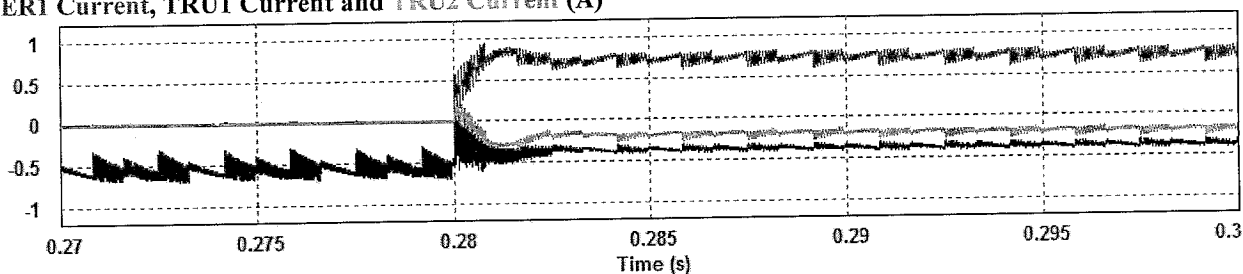
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 0.3 A.

Сценарий 3

ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



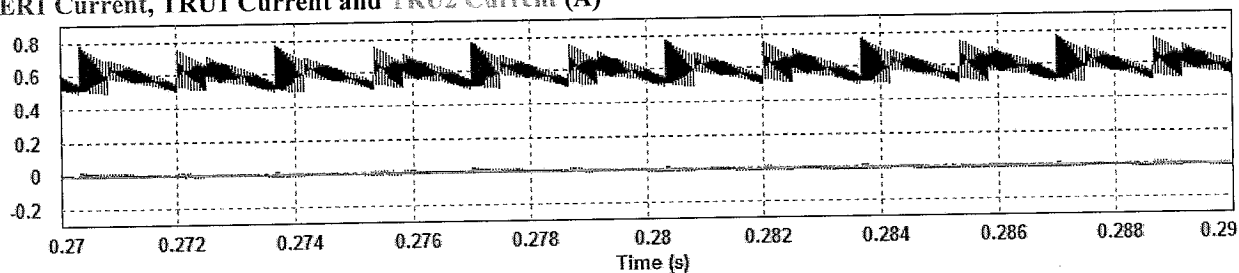
Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 0.94 A.

6. Замыкание на землю отрицательного вывода сверхпроводящей катушки

Начальный ток обмотки зафиксирован на 45 кА.

Замыкание на землю происходит при $t=0,28$ с.

ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Замыкание на землю в данном месте не имеет влияния на токи и напряжения системы, так как рассматриваемая точка уже находится у нулевого потенциала.

7. Работа устройства SNU в условиях пробоя на землю

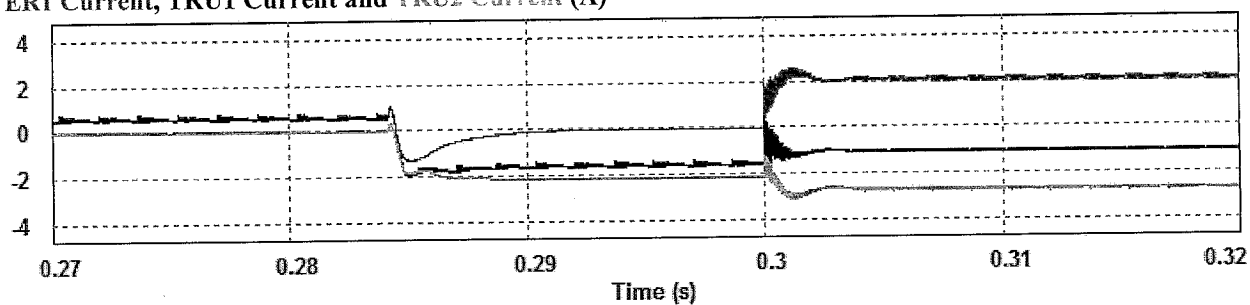
Смоделировано четыре сценария:

1. Работа устройства SNU при пробое на землю обмотки ($\alpha=15^\circ$)
2. Работа устройства SNU при пробое на землю обмотки ($\alpha=135^\circ$)
3. Работа устройства SNU при пробое на землю преобразователя на стороне переменного тока ($\alpha=15^\circ$)
4. Работа устройства SNU при пробое на землю преобразователя на стороне переменного тока ($\alpha=135^\circ$)

Пробой на землю происходит при $t=0,3$ с.

Сценарий 1

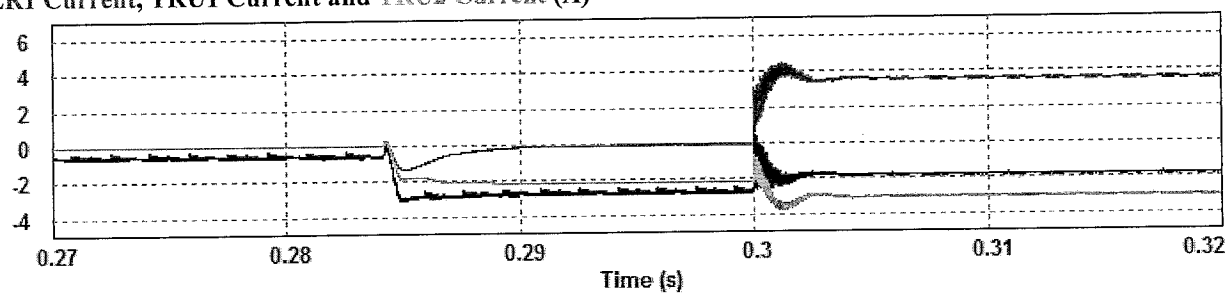
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 2.6 A.

Сценарий 2

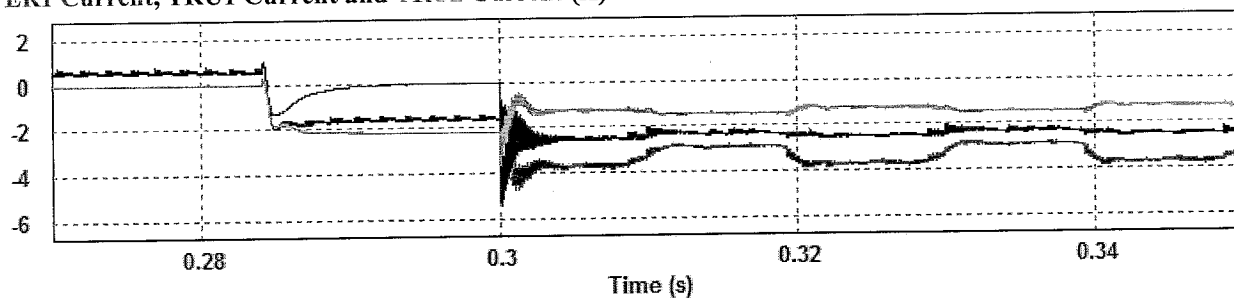
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 2.6 A.

Сценарий 3

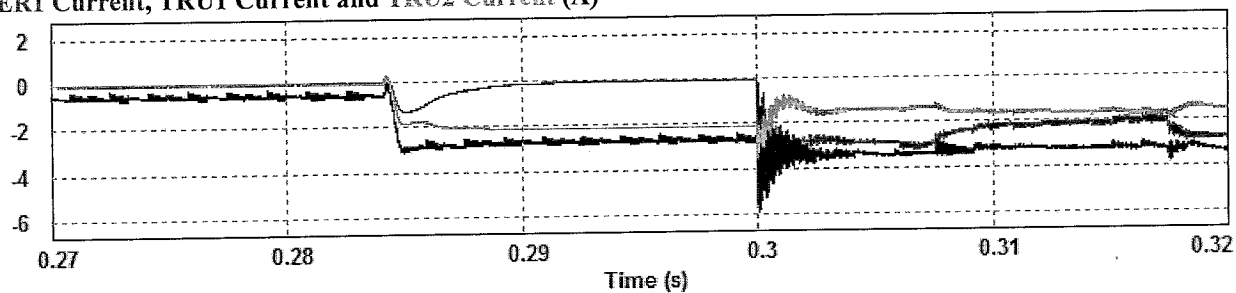
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 4.75 A.

Сценарий 4

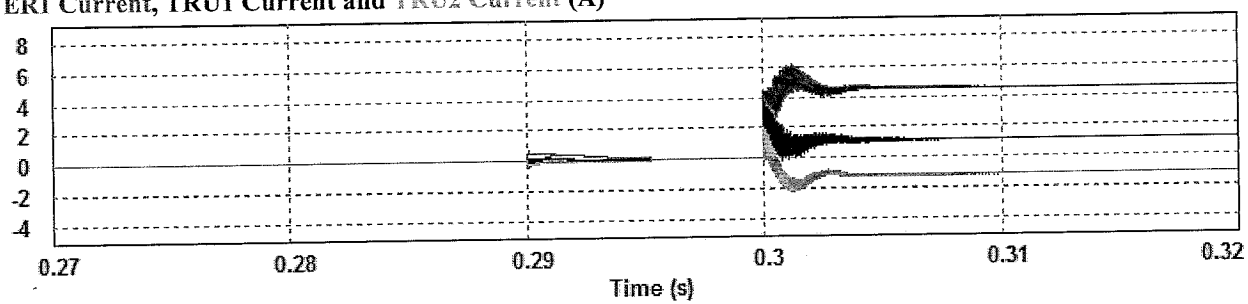
ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 3.9 A.

8. Работа устройства FDU в условиях пробоя на землю

ER1 Current, TRU1 Current and TRU2 Current (A)



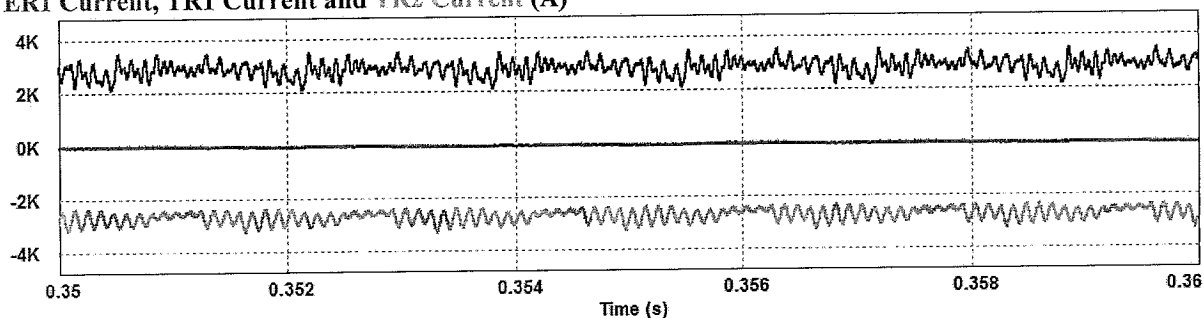
Амплитудное значение тока заземляющего резистора – 6.2 А.

Установившееся значение тока заземляющего резистора – 4.5 А.

Переходные процессы в системе заземления обмоток PF2-PF5

1. Работа в установившемся режиме

ER1 Current, TR1 Current and TR2 Current (A)



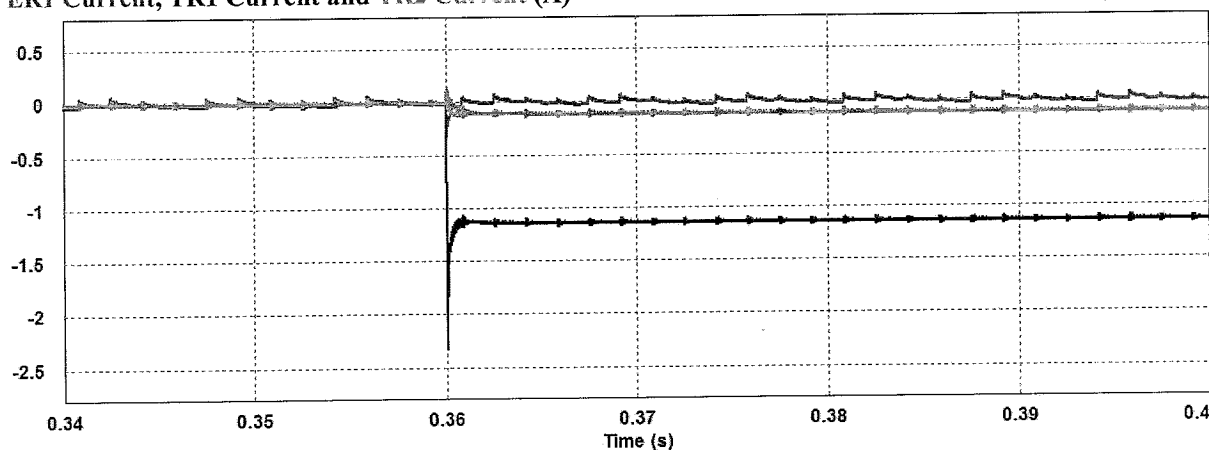
Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.006 A.

2. Работа устройства FDU

2.1 Одновременная коммутация устройств FDU (сценарий 1)

Устройства FDU размыкаются одновременно при $t=0.35$ с.

ER1 Current, TR1 Current and TR2 Current (A)

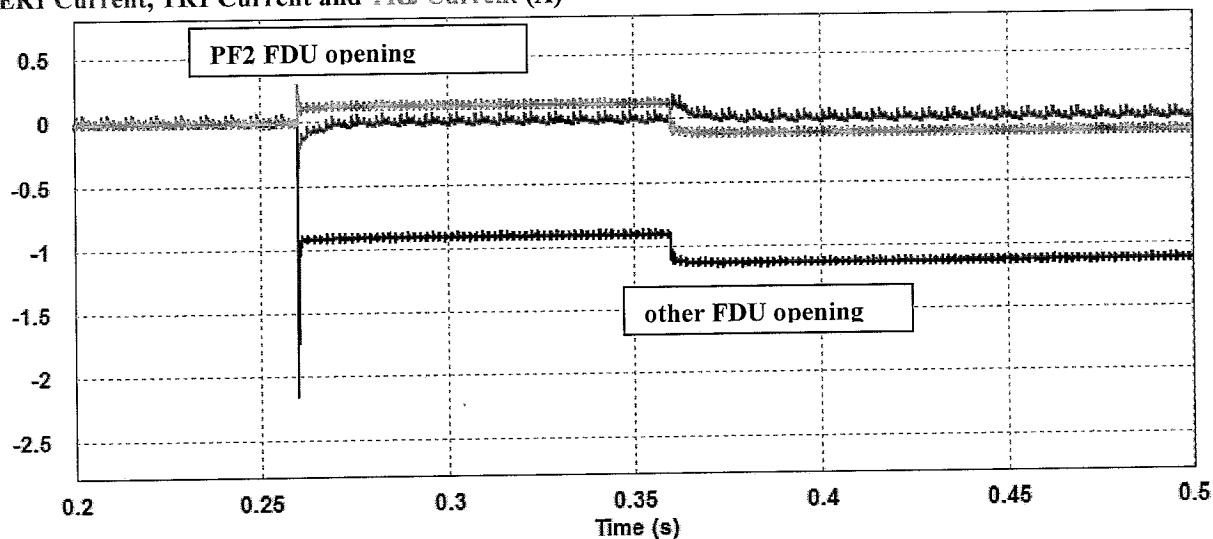


Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.32 A.

2.2 Последовательная коммутация устройств FDU (сценарий 2)

PF2 FDU размыкаются при $t=0.25$ с и другие устройства FDU размыкаются при $t=0.35$ с.

ER1 Current, TR1 Current and TR2 Current (A)

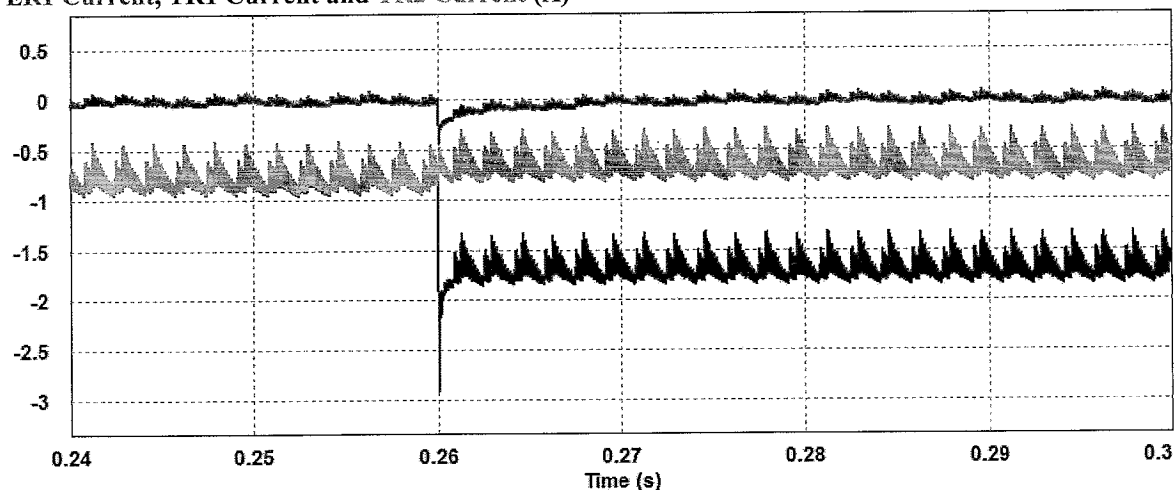


Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.42 A.

2.3 Коммутация одиночного устройства FDU (сценарий 3)

PF2 FDU размыкается при $t=0.25$ с. Другие устройства FDU не размыкаются.

ER1 Current, TR1 Current and TR2 Current (A)

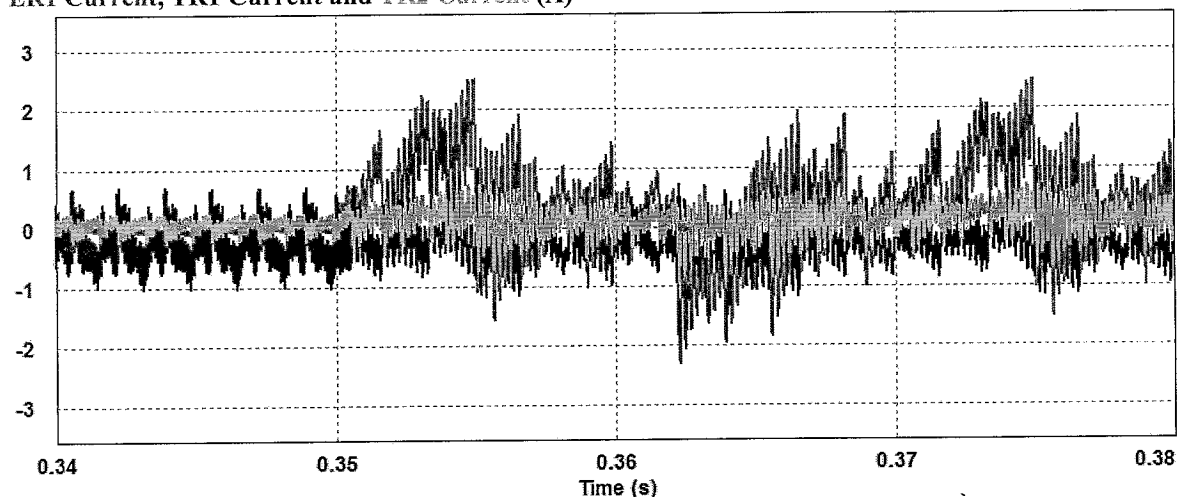


Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.44 А.

3. Пробой преобразователя на землю со стороны переменного тока

3.1. Пробой на землю преобразователя обмотки PF2

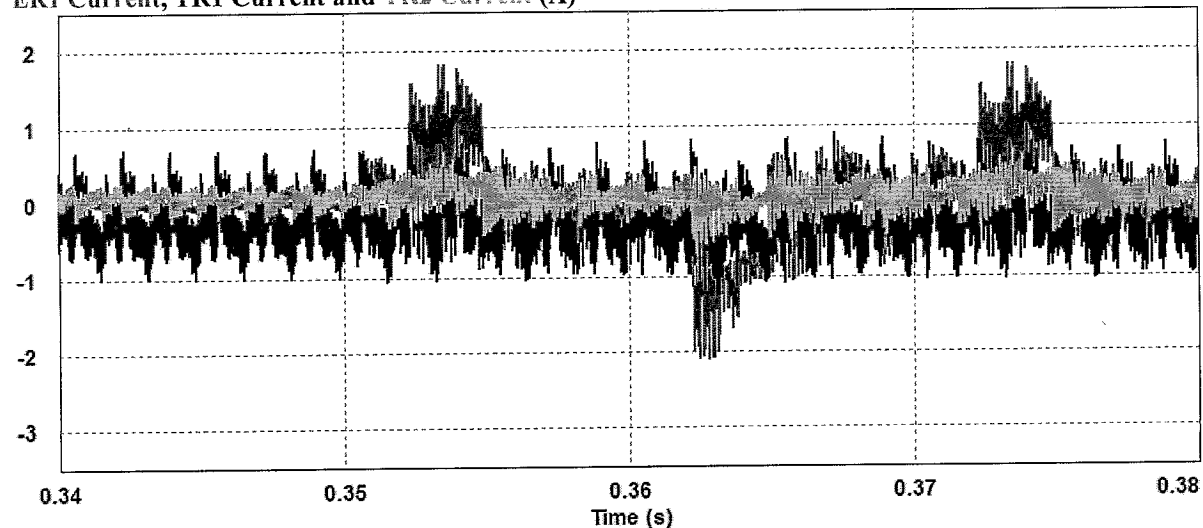
ER1 Current, TR1 Current and TR2 Current (A)



Диапазон изменения тока заземляющего резистора – 4.80 А.

3.2. Пробой на землю преобразователя системы вертикальной стабилизации

ER1 Current, TR1 Current and TR2 Current (A)

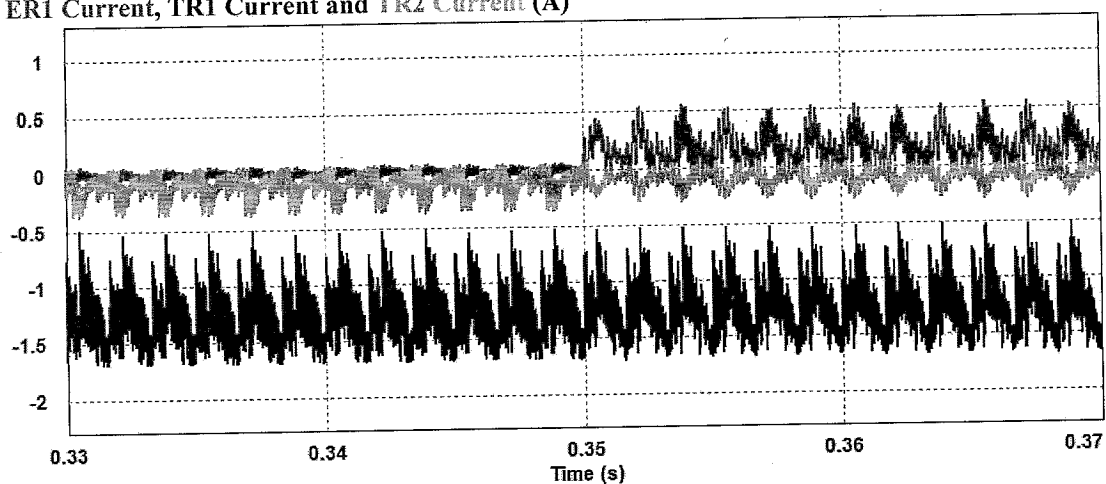


Диапазон изменения тока заземляющего резистора – 3.92 А.

4. Пробой на землю вывода сверхпроводящей катушки

Сценарий 1

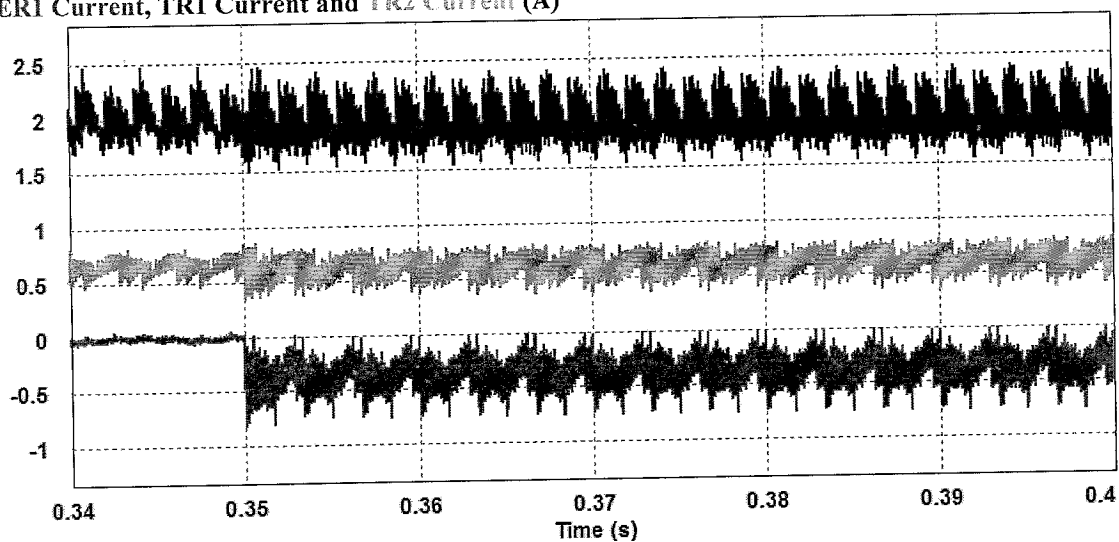
ER1 Current, TR1 Current and TR2 Current (A)



Среднее значение тока заземляющего резистора – 0.56 A.

Сценарий 2

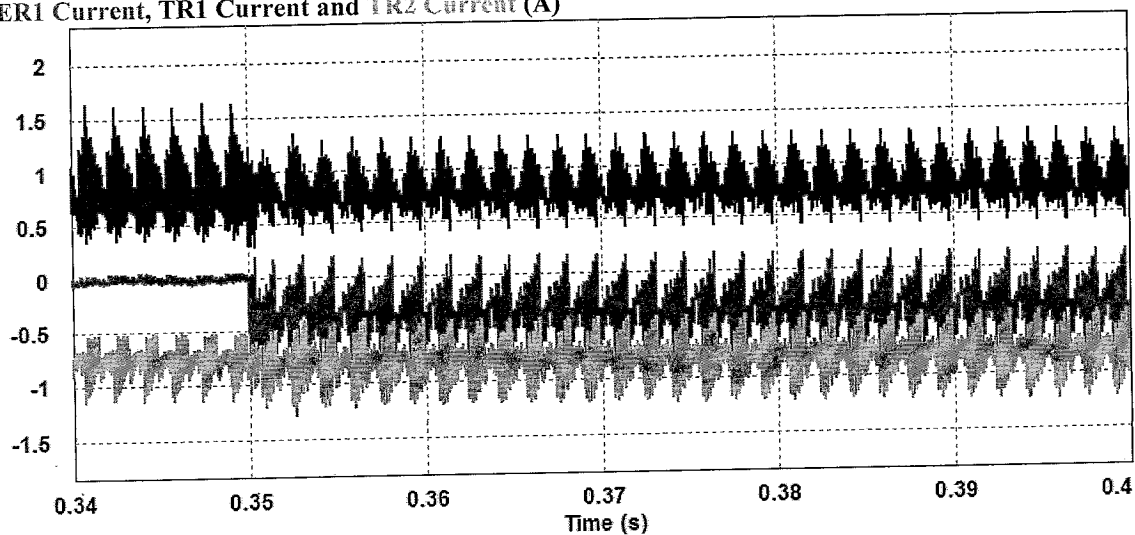
ER1 Current, TR1 Current and TR2 Current (A)



Среднее значение тока заземляющего резистора – 0.35 A.

сценарий 3

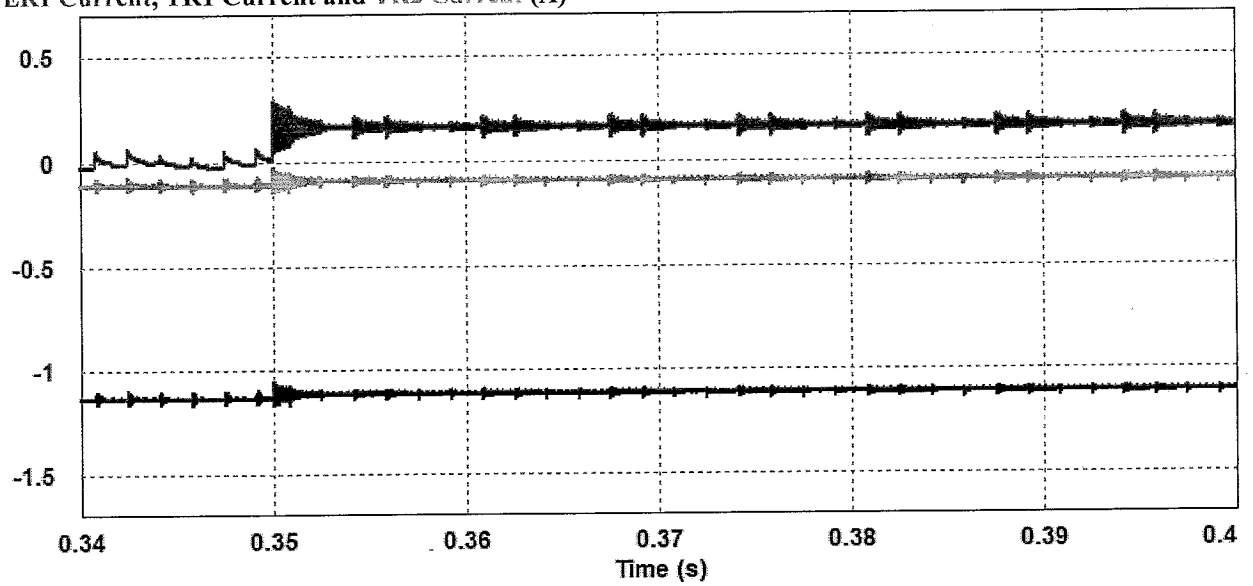
ER1 Current, TR1 Current and TR2 Current (A)



Среднее значение тока заземляющего резистора – 0.43 A.

Сценарий 4

ER1 Current, TR1 Current and TR2 Current (A)



Диапазон изменения тока заземляющего резистора – 0.17 A.

Расчет заземления системы питания обмоток ТГ

1 Работа в установившемся режиме

Смоделировано четыре сценария работы:

1. Напряжение – 678 В, угол управления α – 15°, ток обмотки – 67 кА;
2. Напряжение – 678 В, угол управления α – 90°, ток обмотки – 67 кА;
3. Напряжение – 340 В, угол управления α – 90°, ток обмотки – 68 кА;
4. Работа устройства FDU при токе обмотки 68 кА.

В таблице представлены максимальные значения токов в заземляющем резисторе для вышеуказанных сценариев.

Сценарий	1	2	3	4
Макс. ток ER	0.01A	0.01A	<0.01A	0.3A

2 Короткие замыкания преобразователя боковой обмотки АС

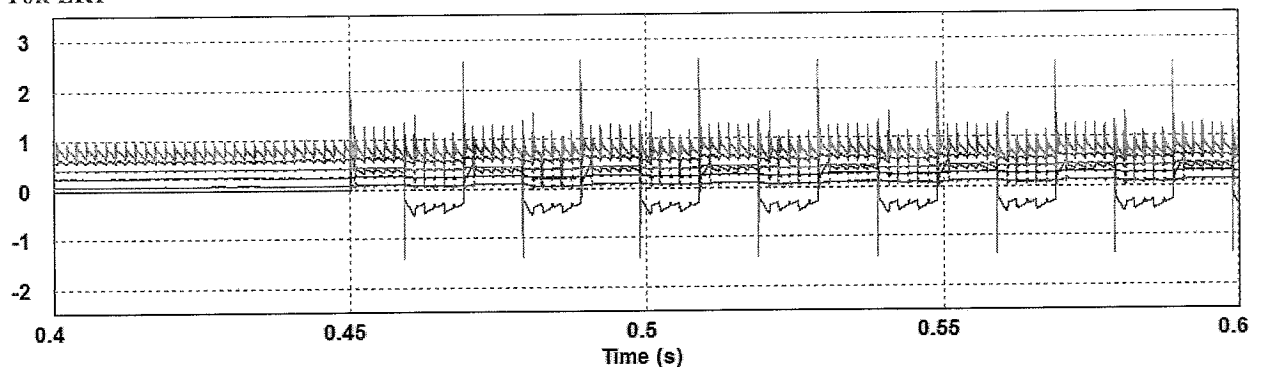
Смоделировано три сценария:

1. Напряжение – 678 В, угол управления α – 15°, ток обмотки – 67 кА
2. Напряжение – 678 В, угол управления α – 90°, ток обмотки – 67 кА;
3. Напряжение – 340 В, угол управления α – 90°, ток обмотки – 68 кА.

Пробой на землю происходит при $t=0,45$ с.

Сценарий 1

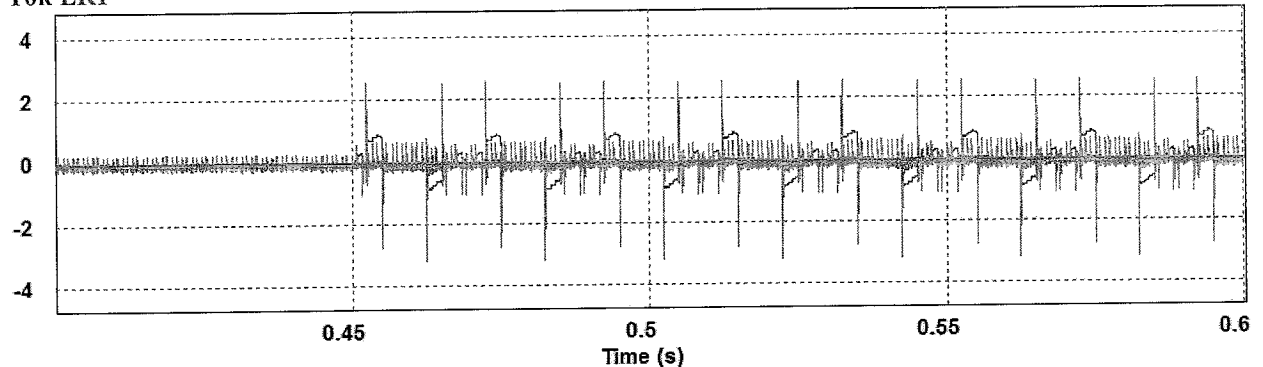
Ток ER1



Максимальное значение тока заземляющего резистора – 1.15 А.

Сценарий 2

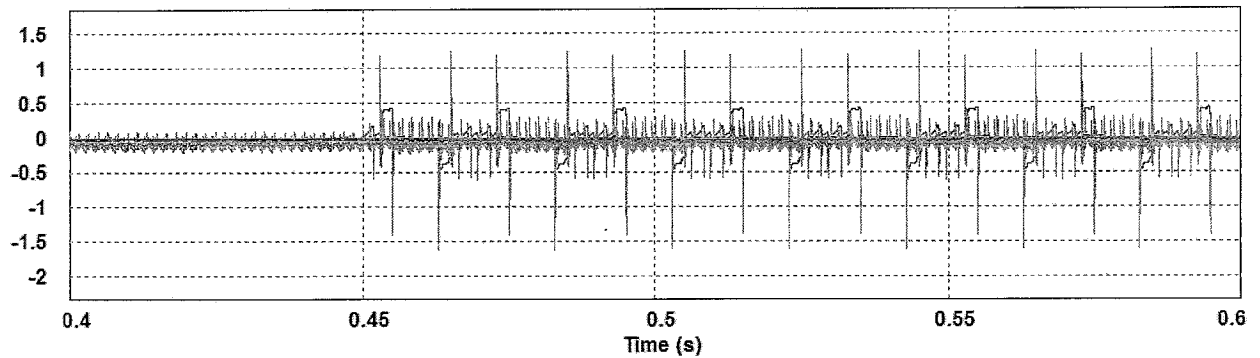
Ток ER1



Максимальное значение тока заземляющего резистора – 1.8 А.

Сценарий 3

Ток ER1



Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.89 А.

3 Пробой катушки

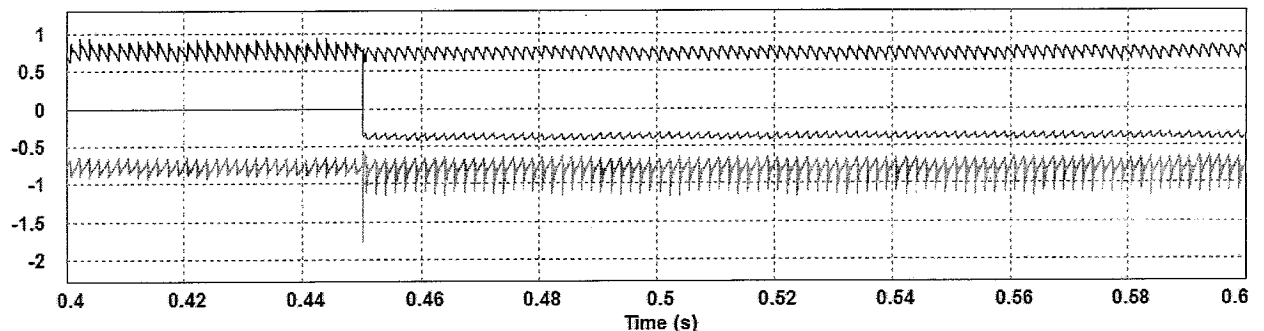
Смоделировано шесть сценариев:

1. Пробой на землю положительного вывода преобразователя при следующих условиях:
Напряжение – 678 В, угол управления α – 15° , ток обмотки – 67 кА;
2. Пробой на землю положительного вывода катушки при следующих условиях:
Напряжение – 678 В, угол управления α – 15° , ток обмотки – 67 кА;
3. Пробой на землю положительного вывода преобразователя при следующих условиях:
Напряжение – 678 В, угол управления α – 90° , ток обмотки – 68 кА;
4. Пробой на землю положительного вывода катушки при следующих условиях:
Напряжение – 678 В, угол управления α – 90° , ток обмотки – 68 кА;
5. Пробой на землю положительного вывода преобразователя при следующих условиях:
Напряжение – 340 В, угол управления α – 90° , ток обмотки – 68 кА.
6. Пробой на землю положительного вывода катушки при следующих условиях:
Напряжение – 340 В, угол управления α – 90° , ток обмотки – 68 кА.

Короткое замыкание происходит при $t=0,45$ с

Сценарий 1

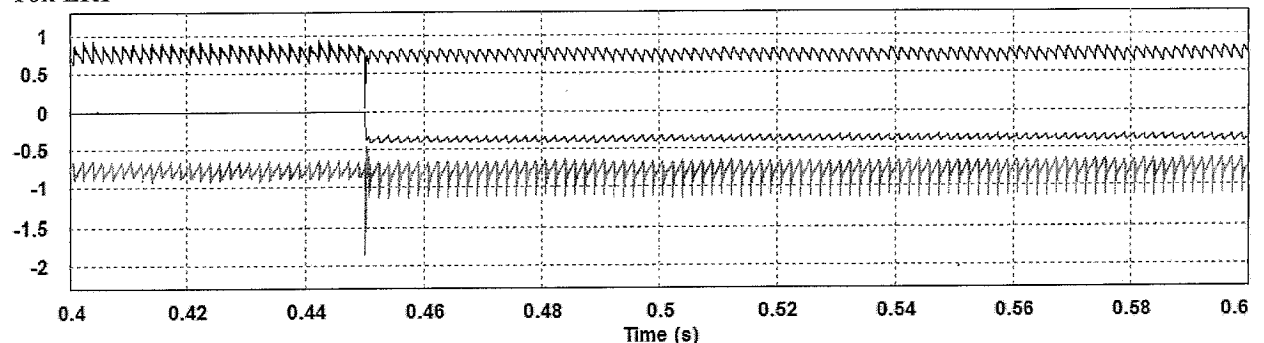
Ток ER1



Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.42 А.

Сценарий 2

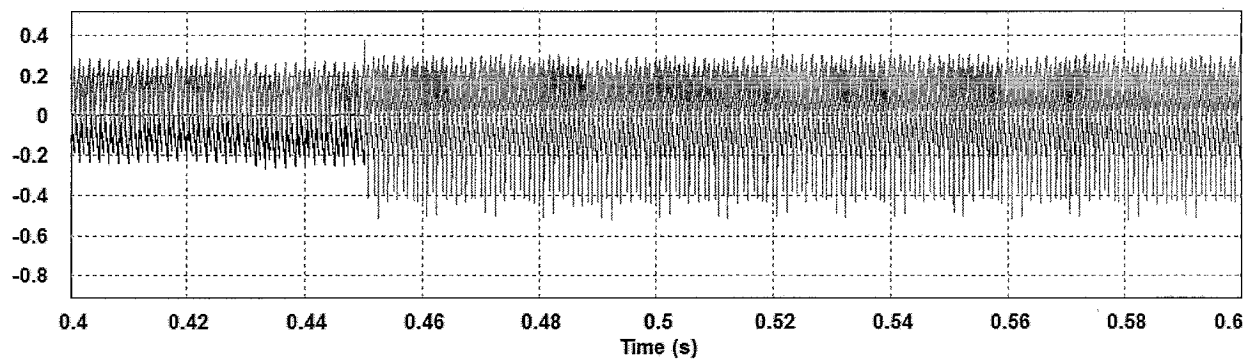
Ток ER1



Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.42 А.

Сценарий 3

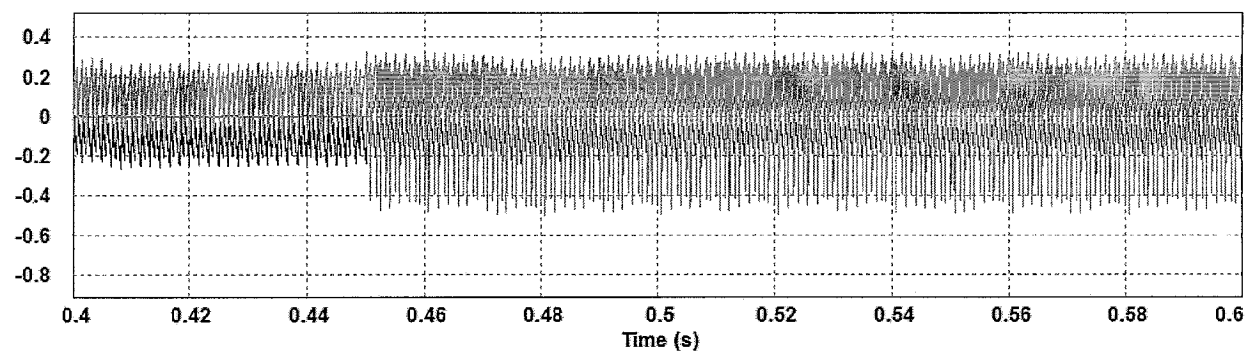
Ток ER1



Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.11 А.

Сценарий 4

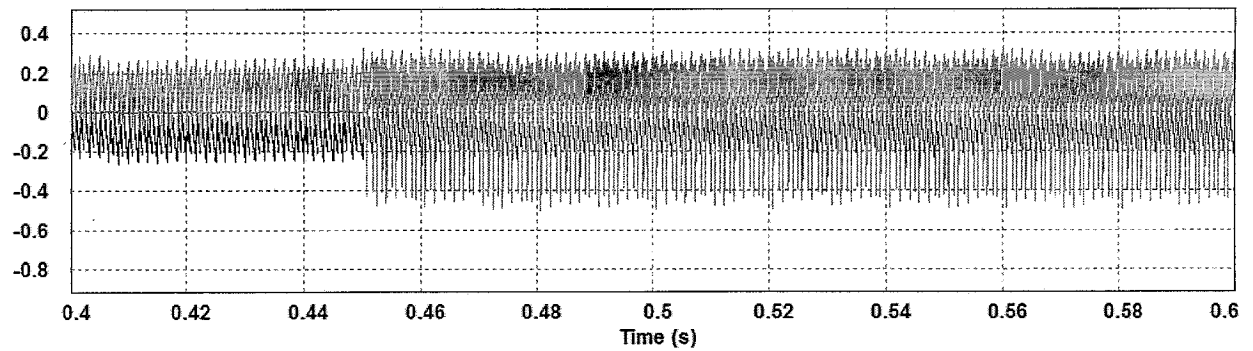
Ток ER1



Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.12 А.

Сценарий 5

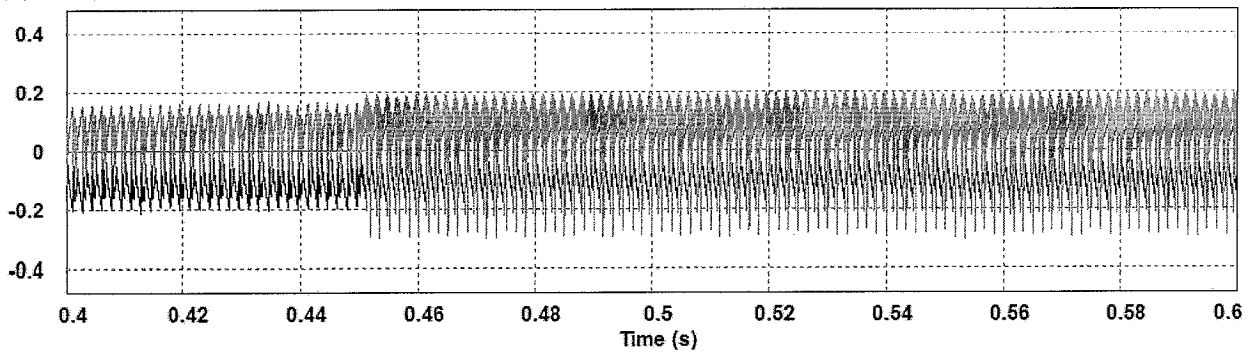
Ток ER1



Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.09 А.

Сценарий 6

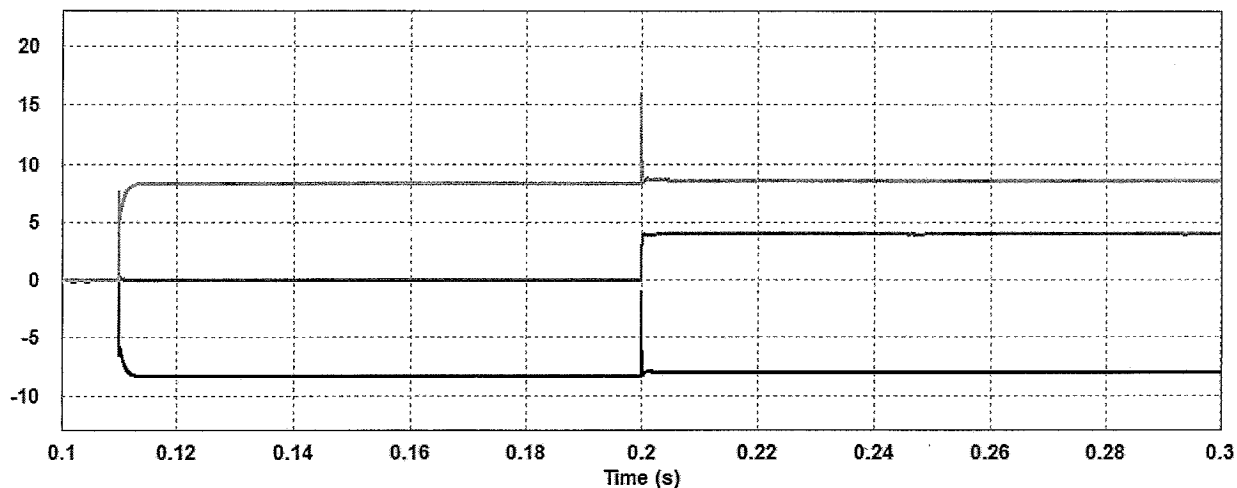
Ток ER1



Максимальное значение тока заземляющего резистора – 0.09 А.

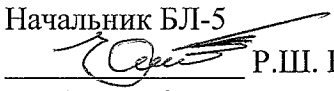
4 Работа устройства FDU при пробое на землю

Ток ER1

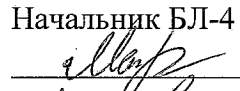


Максимальное значение тока заземляющего резистора – 4.08 А

Начальник БЛ-5


Р.И. Еникеев
«11» августа 2015 г.

Начальник БЛ-4


М.В. Манзук
«11» августа 2015 г.