



ЭКРА

СОХРАНЯЯ ЭНЕРГИЮ

Защита от однофазных
замыканий на землю в
обмотке статора генераторов,
гальванически связанных с
распределительной
кабельной сетью 6-10 кВ

Понамарев Евгений Алексеевич, к.т.н., НОЦ «ЭКРА»

Пашковский С.Н., к.т.н., НПП «ЭКРА»

Вайнштейн Р.А., д.т.н., НИ «ТПУ»

Известны решения по выполнению селективной защиты от однофазных замыканий на землю в компенсированных сетях с большим емкостным током на принципе замера высших гармоник в токах нулевой последовательности (Кискачи В.М.). Основная сложность выполнения такой защиты заключается в том, что уровень высших гармоник не стабилен и он может изменяться в широких пределах. Поэтому не представляется возможным сделать защиту с какими-то конкретными уставками по токам высших гармоник.

Есть предложение (Шуин В.А.) использовать в качестве дополнительного средства для выполнения защиты искусственной величины, соответствующей собственному емкостному току защищаемого элемента. Развитие этого метода осуществлялось в работах научного коллектива под руководством Шуина В.А.

Опыт разработки аналогичных защит имеется и в НПП «ЭКРА». Защиты реализованы в микропроцессорных терминалах ЭКРА 217 и эксплуатируются в электрических сетях нашей страны.

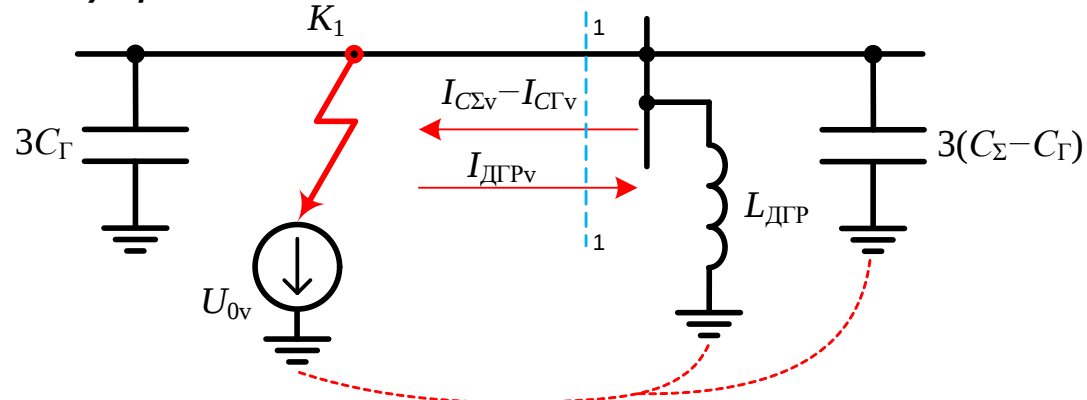
В докладе предложено использовать данный принцип выполнения защиты для генераторов, гальванически связанных с распределительной кабельной сетью 6-10 кВ.

Помимо решения задачи ослабления влияния уровня высших гармоник на работу защиты, обращается также внимание на гармоники, частота которых ниже промышленной, т.к. их использование позволяет повысить надежность функционирования защиты при перемежающихся дуговых замыканиях.

Для исключения зоны нечувствительности защиты при замыканиях вблизи нейтрали генератора, предложено использование третьей гармоники, также с ослаблением влияния ее неустойчивости на работу защиты.

Принцип работы защиты, реагирующей на высшие гармоники в токах нулевой последовательности, при устойчивых замыканиях

Протекание токов гармоник $\nu = 5, 7, 11...$ при внутреннем замыкании



C_{Γ} - емкость одной фазы генератора;

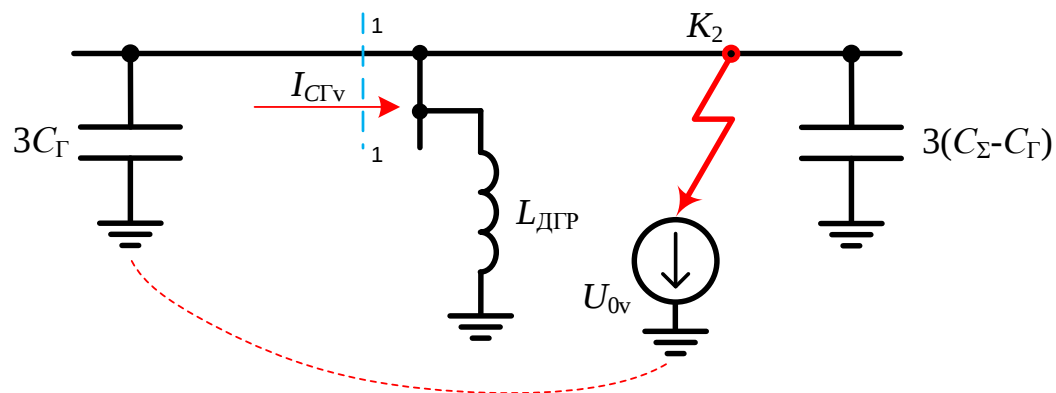
C_{Σ} - суммарная емкость одной фазы всей сети;

ДГР – дугогасящий реактор;

K_1 – замыкание в генераторе (внутреннее);

K_2 – замыкание в сети (внешнее).

Протекание токов гармоник $\nu = 5, 7, 11...$ при внешнем замыкании



Далее имеем ввиду, что в рассматриваемых случаях емкостный ток защищаемого генератора в десятки раз меньше емкостного тока сети, с которой он гальванически связан.

Защиту можно выполнить путем сравнения абсолютного значения токов гармоник (например, действующего) с искусственно формируемой во вторичных цепях электрической величиной, пропорциональной току при внешнем замыкании с учетом того, что емкостные токи связаны с напряжением нулевой последовательности как $C \frac{dU_0}{dt}$.

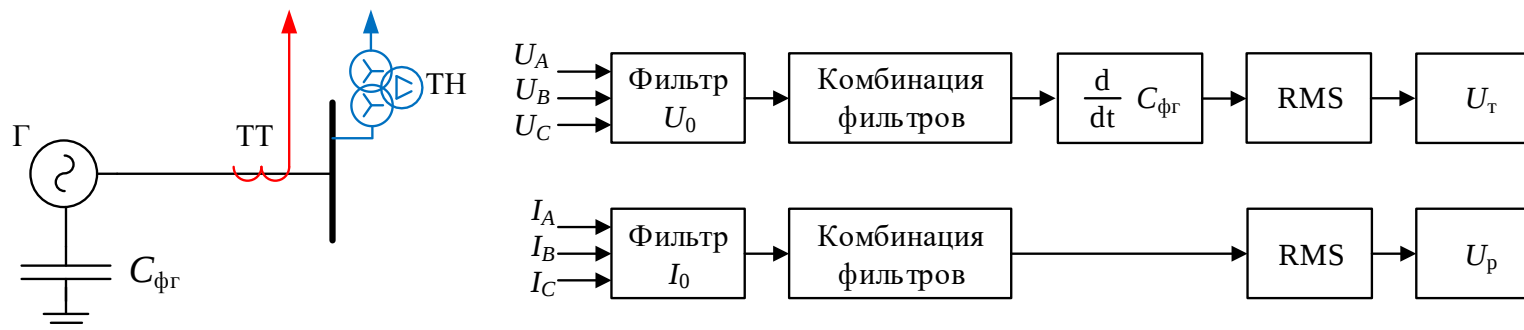
Величина пропорциональная току, измеренному на выводах генератора, – рабочий сигнал (U_p);

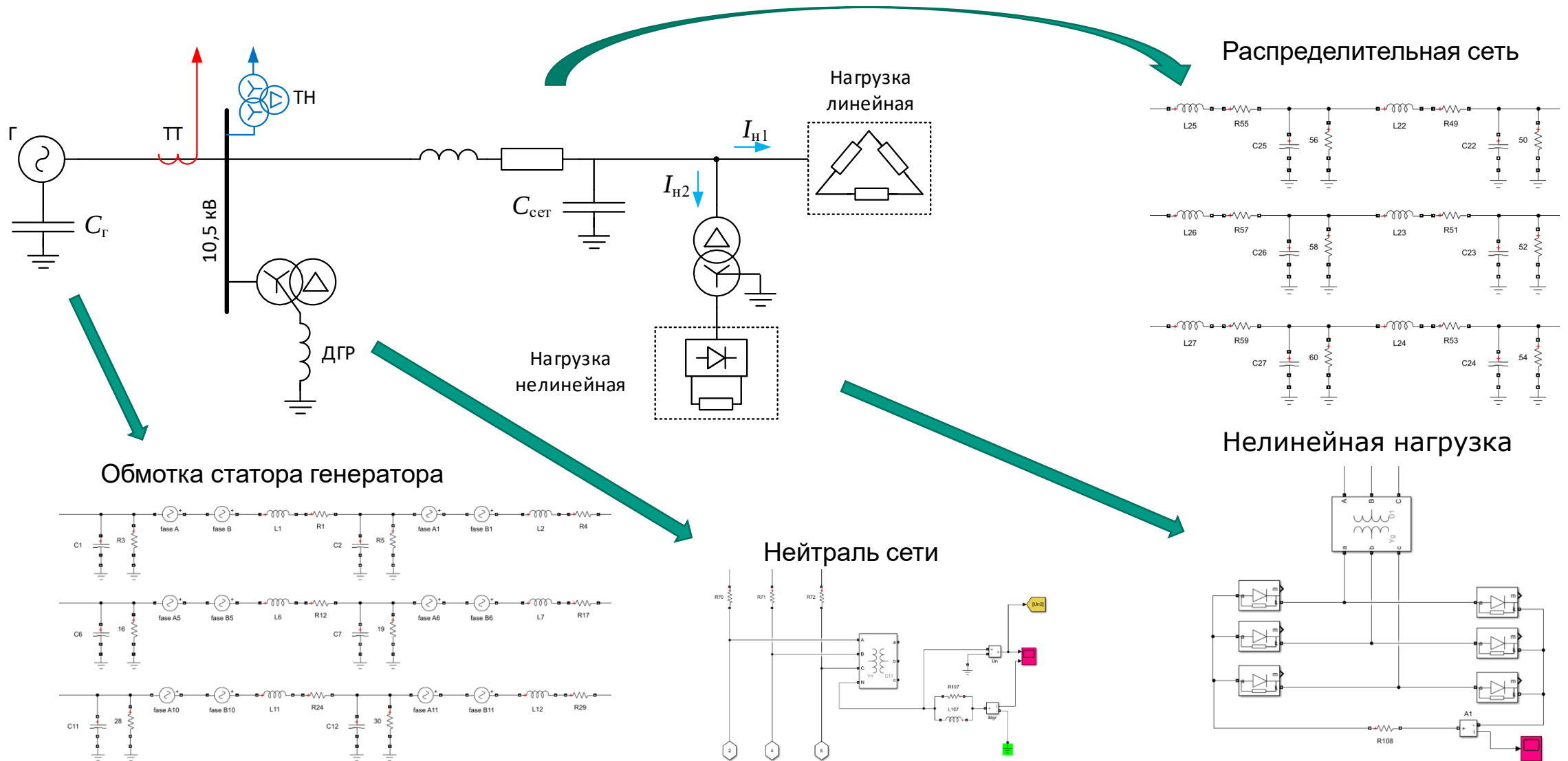
Величина пропорциональная $C_{\text{фг}} \frac{dU_0}{dt}$ – тормозной сигнал (U_T).

Условие срабатывания защиты:

$$U_p \geq U_{\text{ср}} + K_T U_T,$$

где K_T – коэффициент торможения,
 $U_{\text{ср}}$ – начальный порог срабатывания





Результаты расчетов устойчивых замыканий в различных точках сети

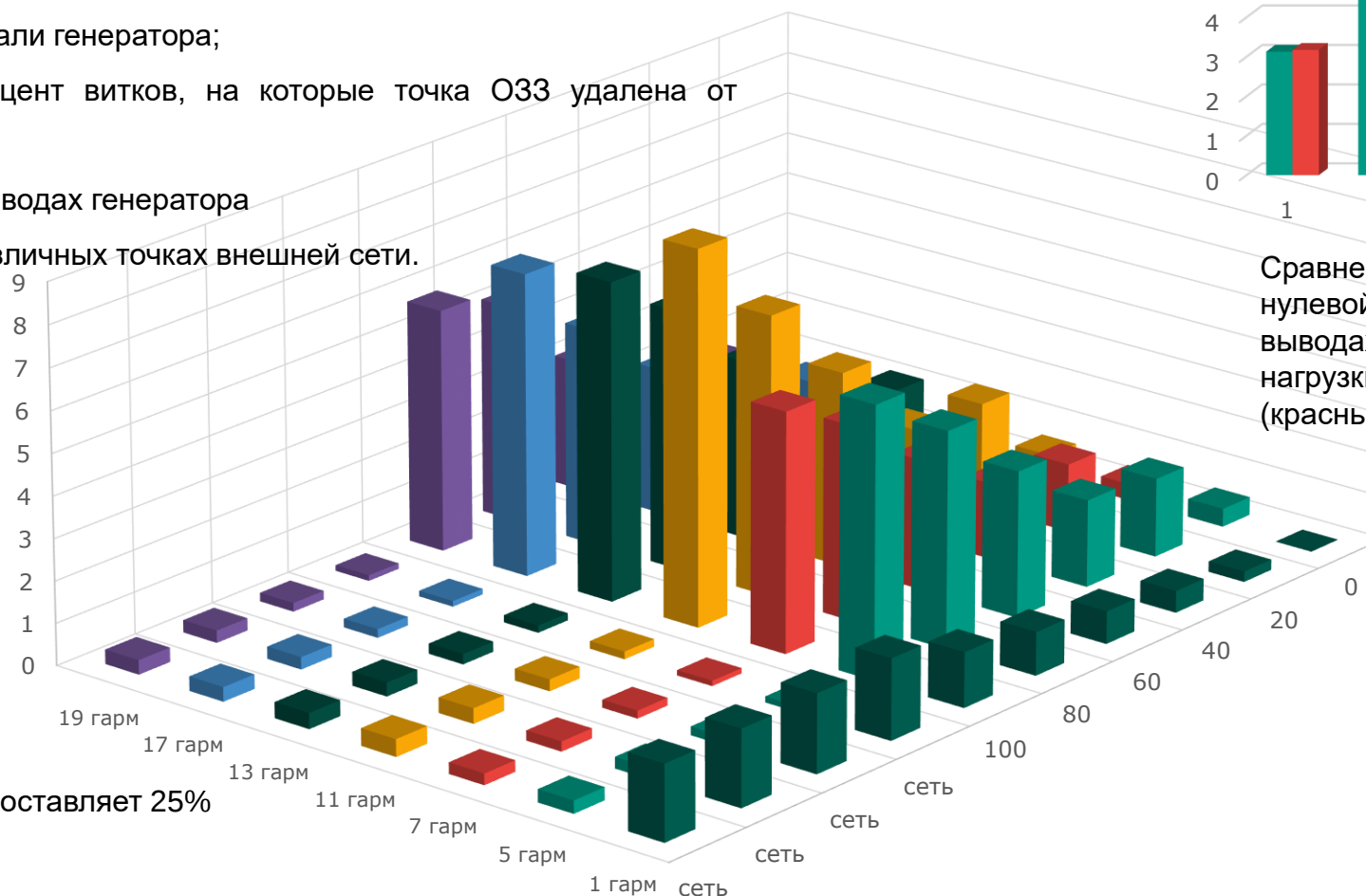
Спектральная диаграмма содержания высших гармоник в токе нулевой последовательности, замеренном на выводах генератора, при устойчивом замыкании в различных точках моделируемой сети:

0 – замыкание в нейтрали генератора;

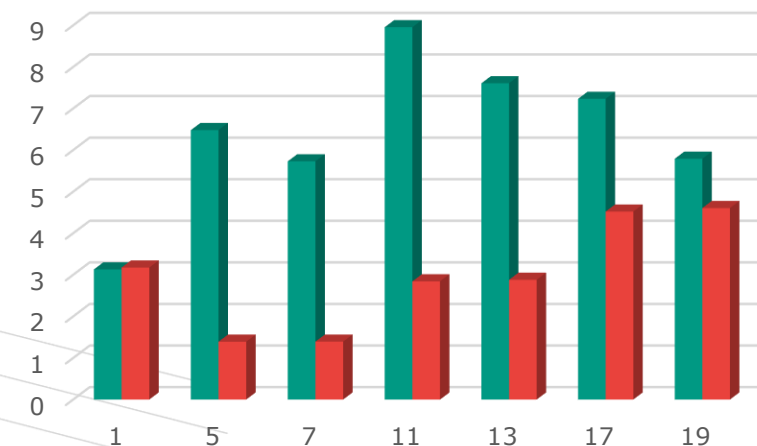
20, 40, 60, 80 – процент витков, на которые точка ОЗЗ удалена от нейтрали генератора;

100 – замыкание на выводах генератора

сеть – замыкание в различных точках внешней сети.



Нелинейная нагрузка составляет 25%



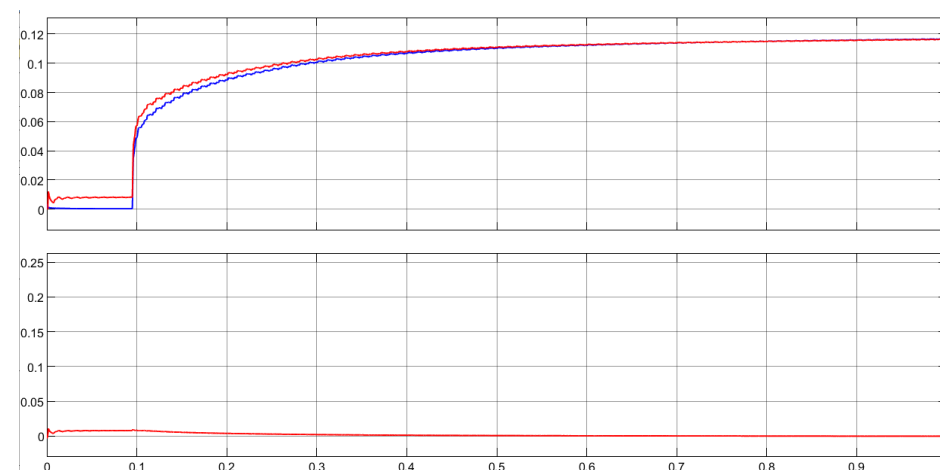
Сравнение уровней высших гармоник в токе нулевой последовательности при замыкании на выводах генератора при доле нелинейной нагрузки 25% (зеленые столбики) и 6 % (красные столбики)

Внешнее
замыкание

— i_0
— $C_{\text{фг}} \frac{du_0}{dt}$

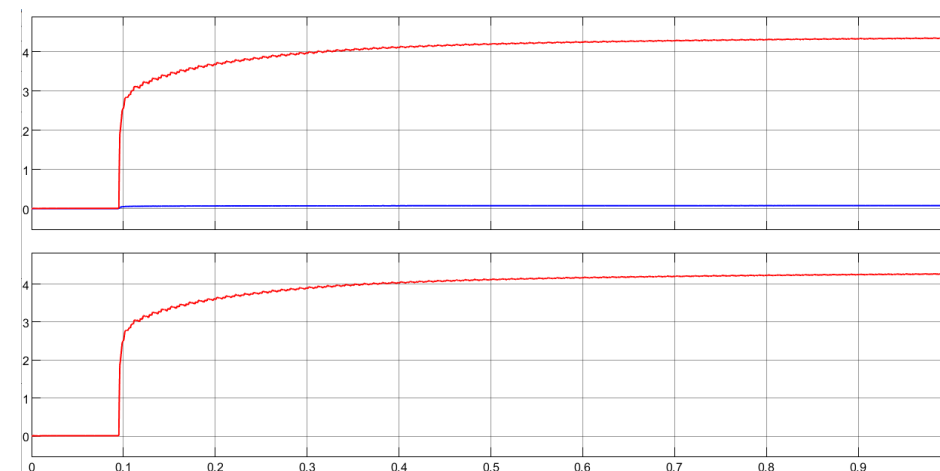


Сигналы в измерительной части защиты

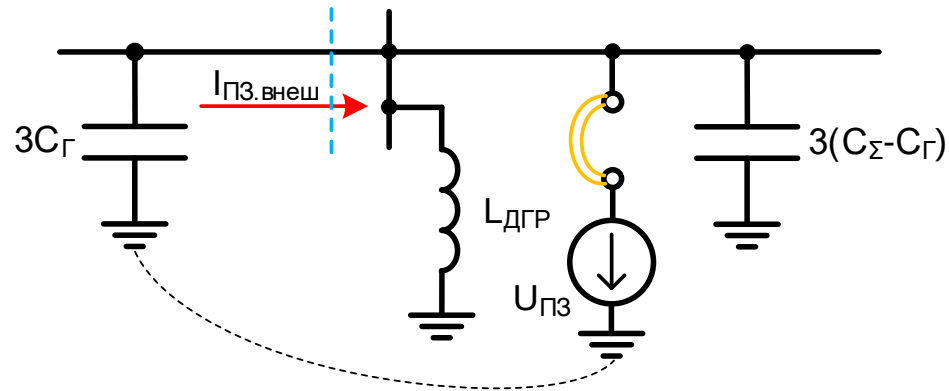


Внутреннее
замыкание

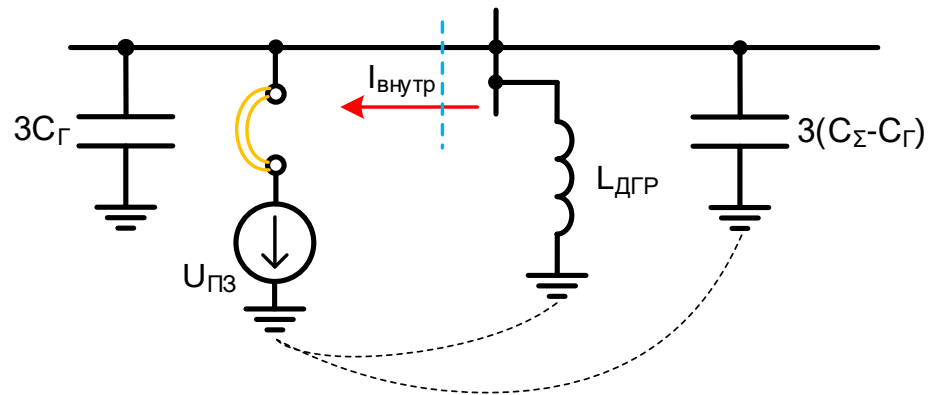
— i_0
— $C_{\text{фг}} \frac{du_0}{dt}$



Протекание токов при внешнем замыкании



Протекание токов при внутреннем замыкании

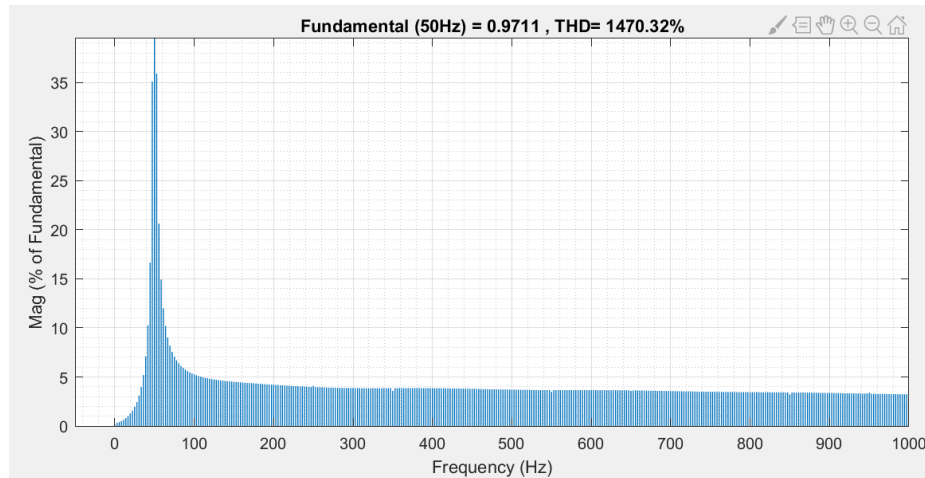


При перемежающихся замыканиях спектр токов и напряжения нулевой последовательности занимает широкую полосу частот. В сети с компенсацией емкостного тока они содержат составляющие с частотой как выше промышленной, так и ниже промышленной.

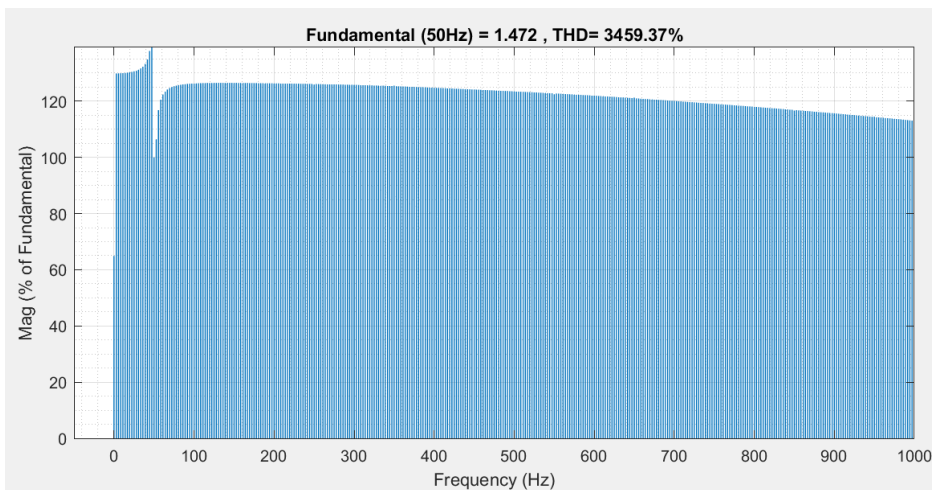
Следует обратить внимание, что при частотах больше промышленной $\nu > 1$ ($\nu = 5, 7 \dots$), токи этих частот определяются в основном емкостной проводимостью фаз сети, а при $\nu < 1$, наоборот, токи в большей степени определяются проводимостью дугогасящих реакторов.

Результаты расчетов перемежающихся дуговых замыканий

Спектр тока нулевой последовательности на
выводах генератора



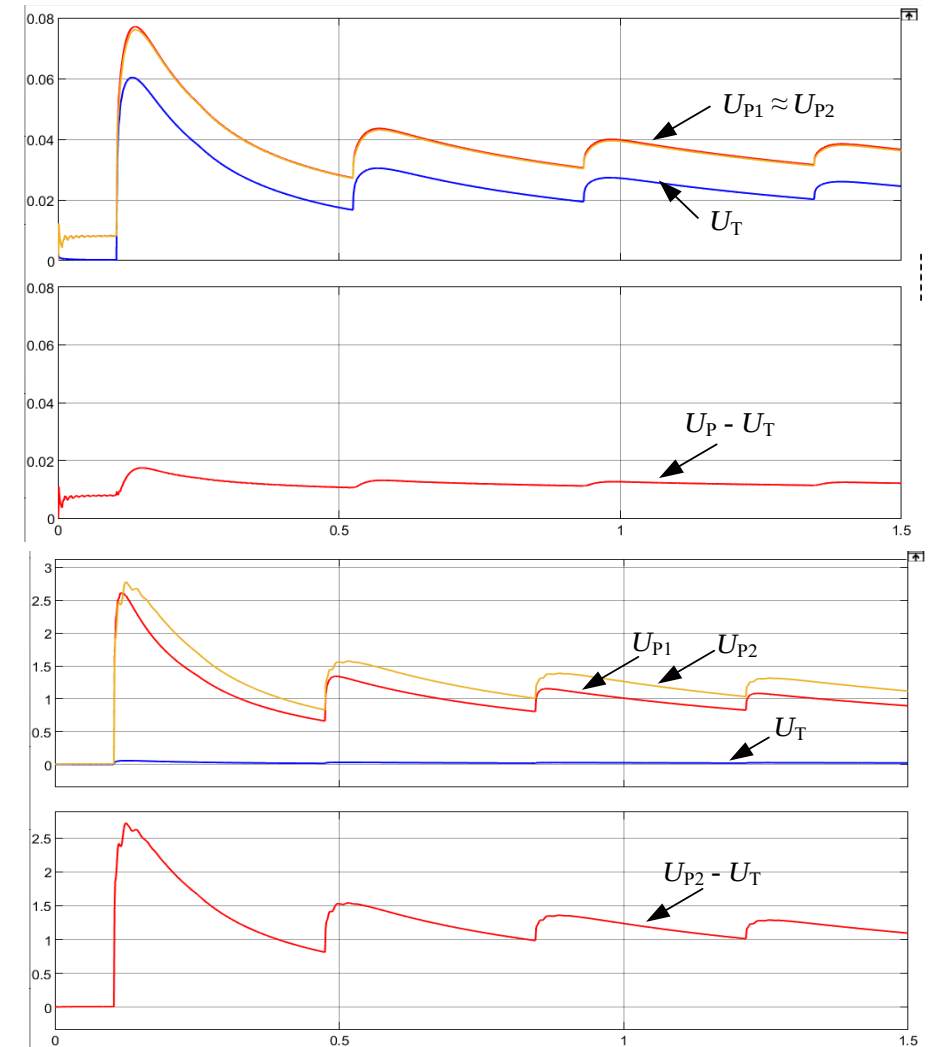
Внешнее
замыкание



Внутреннее
замыкание

23.04.2025

Сигналы в измерительной части защиты:
 U_{P1} – без учета гармоник с частотой ниже промышленной
 U_{P2} – с учетом гармоник с частотой ниже промышленной



Возможная реализация функции устранения зоны нечувствительности на базе использования составляющих тока третьей гармоники

Так как проводимость фаз относительно земли во внешней сети намного больше емкостной проводимости фаз генератора то напряжение третьей гармоники вдоль обмотки распределяется как показано на схеме (практически полностью вытесняется на нейтраль). Напряжение на нейтрали генератора $U = E_3$.

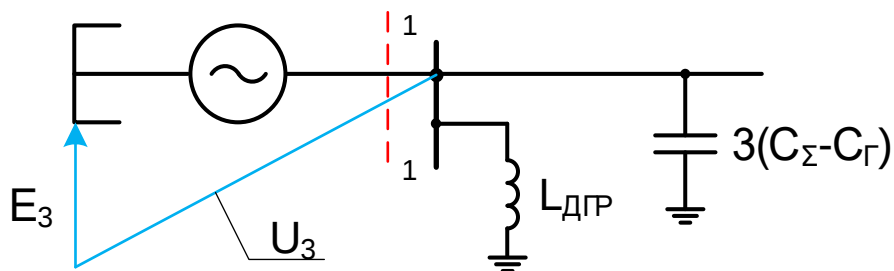
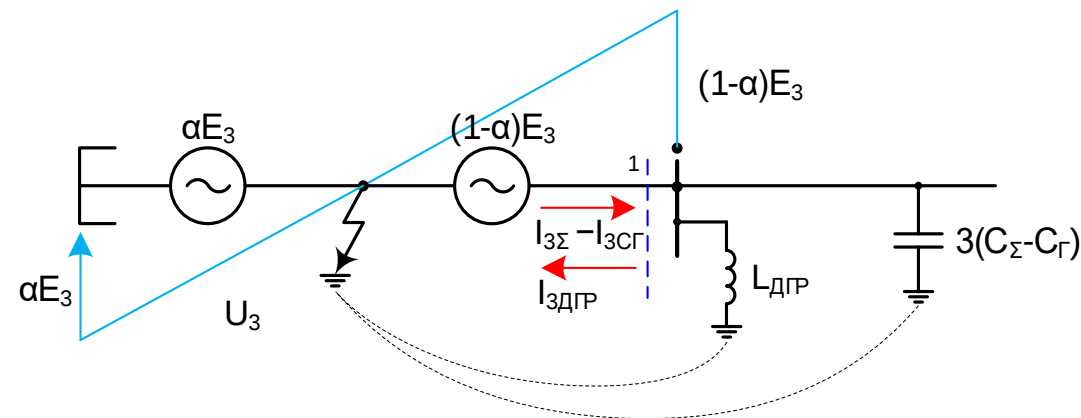


Схема замещения для третьей гармоники в нормальном режиме.

U_3 – распределение напряжения третьей гармоники вдоль обмотки статора

При внутреннем замыкании в точке, отстоящей от нейтрали на α относительного числа витков, схема приведена на рис. 8.



Ток в месте установки трансформаторов тока защиты:

$$I_3 = (1 - \alpha)E_3 \left[3\omega_{\Pi}(C_{\Sigma} - C_{\Gamma}) - \frac{1}{3\omega_{\Gamma}L_{\text{дгр}}} \right];$$

Напряжение нулевой последовательности, измеряемое на выводах генератора:

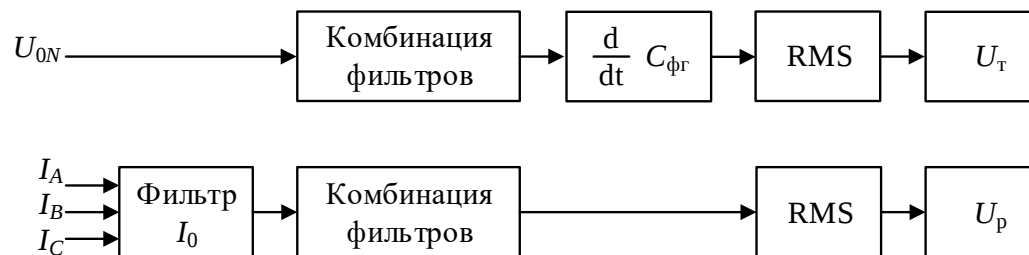
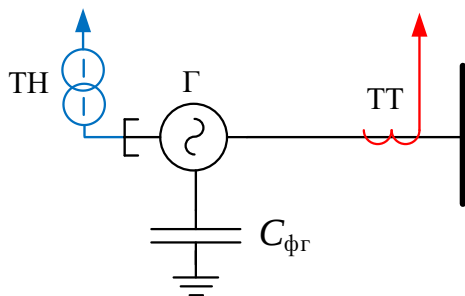
$$U_{03} = (1 - \alpha)E_3^*,$$

На нейтрали:

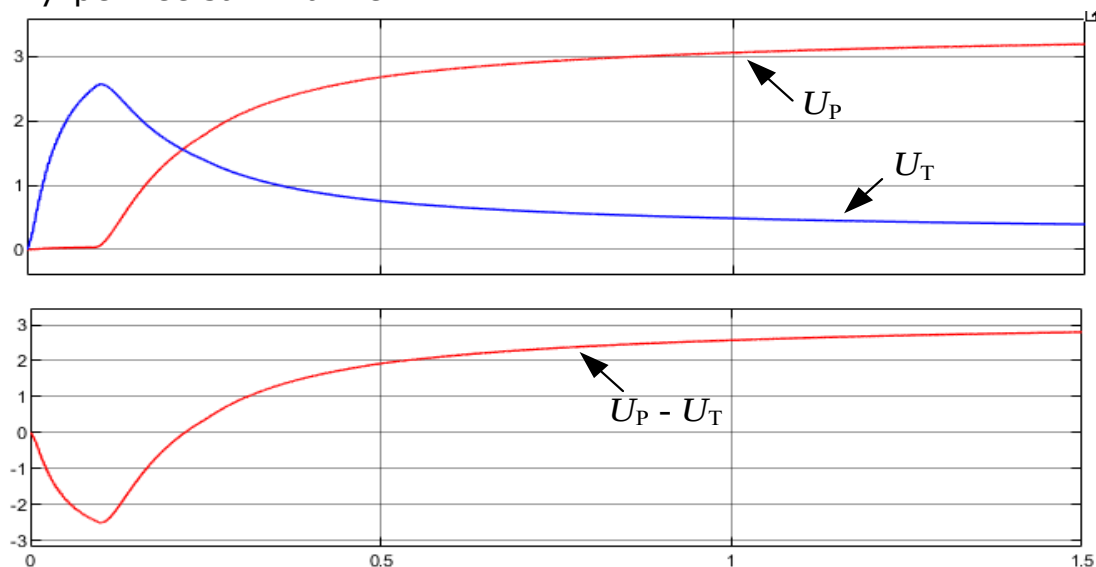
$$U_3 = \alpha \cdot E_3^*.$$

Возможная реализация функции устранения зоны нечувствительности на базе использования составляющих тока третьей гармоники

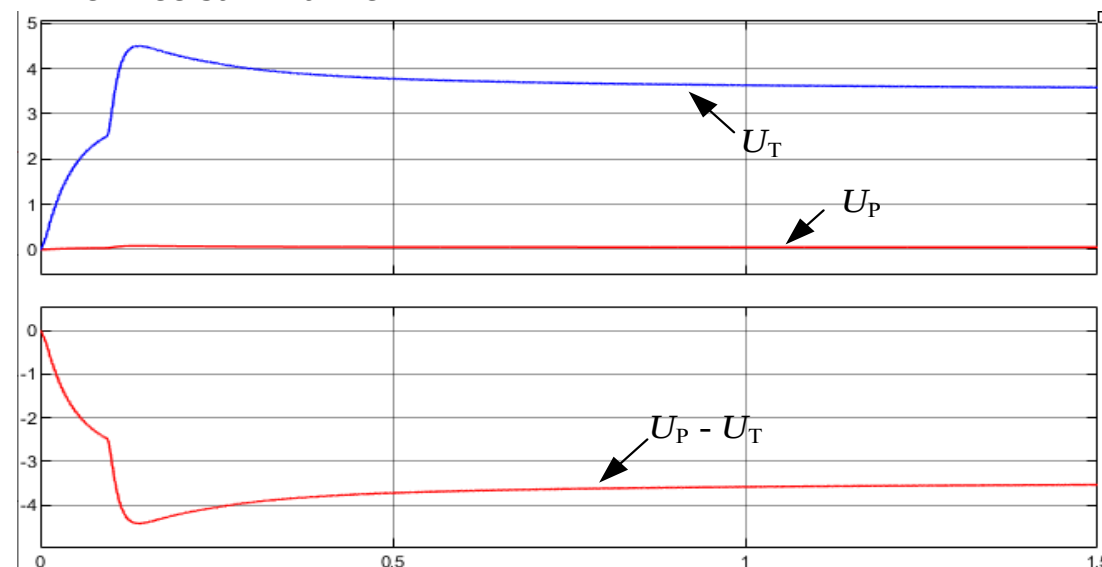
На осциллограммах приведены результаты расчетов на математической модели. Уровень третьей гармоники в ЭДС генератора задан равным 2% от уровня основной гармоники. Рабочий канал (U_p) формирует сигнал по току нулевой последовательности на выводах генератора. Тормозной канал (U_T) формирует сигнал по напряжению нулевой последовательности в нейтрали генератора.



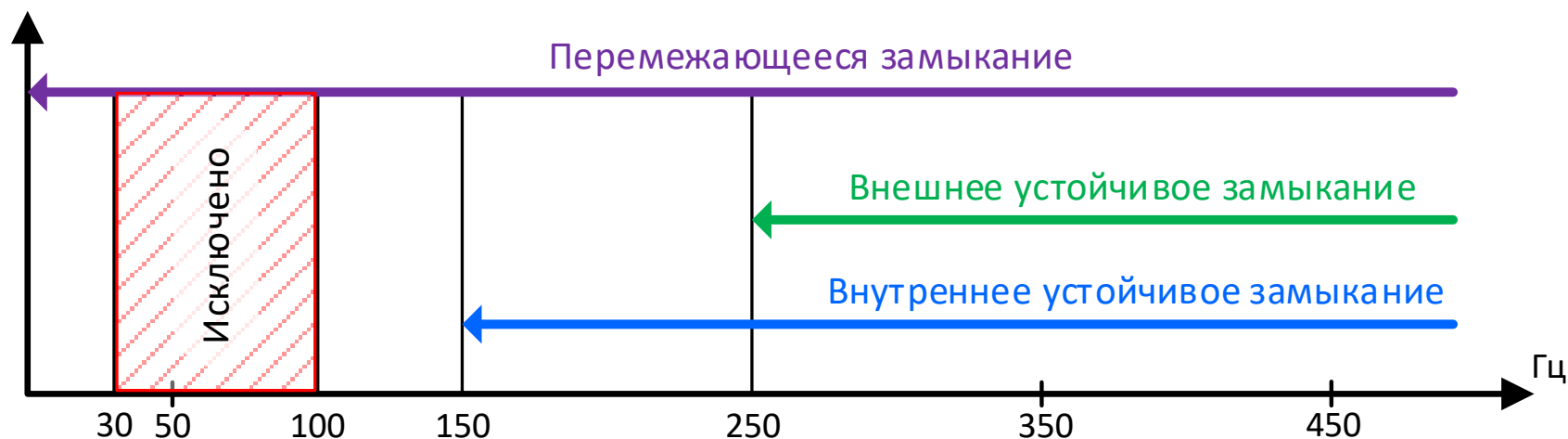
Внутреннее замыкание



Внешнее замыкание



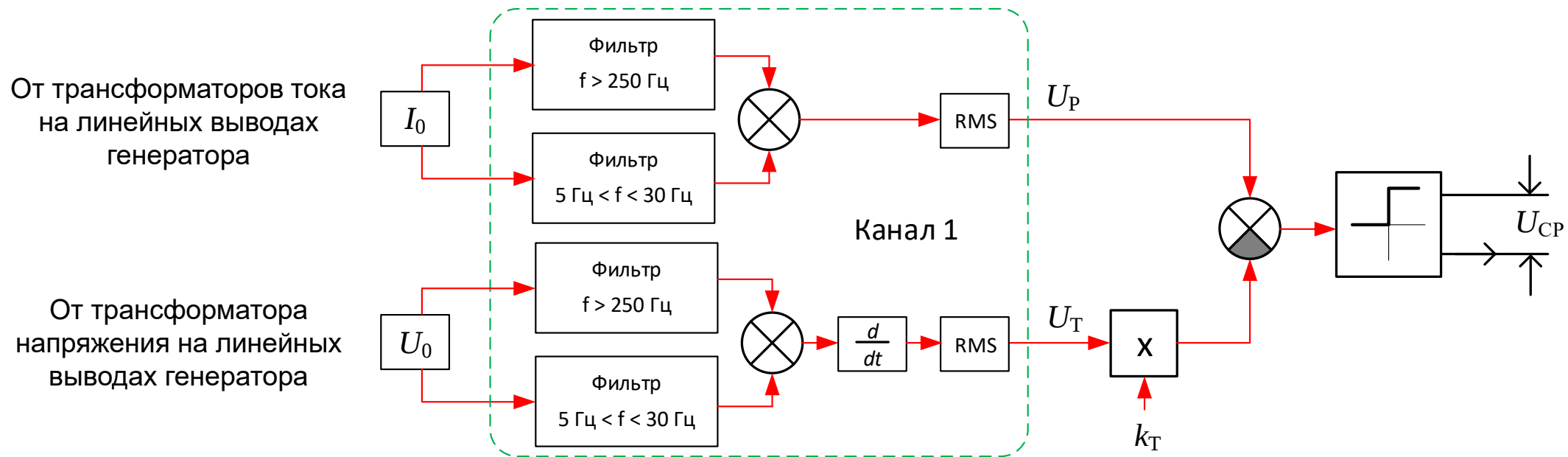
Частота токов в месте установки трансформаторов нулевой последовательности, используемых при различных видах замыканий на землю



Токи с частотой 50 Гц должны быть исключены для отстройки от тока небаланса фильтра токов нулевой последовательности, а также и потому, что в сети с компенсацией емкостного тока токи этой частоты не несут информации о месте замыкания.

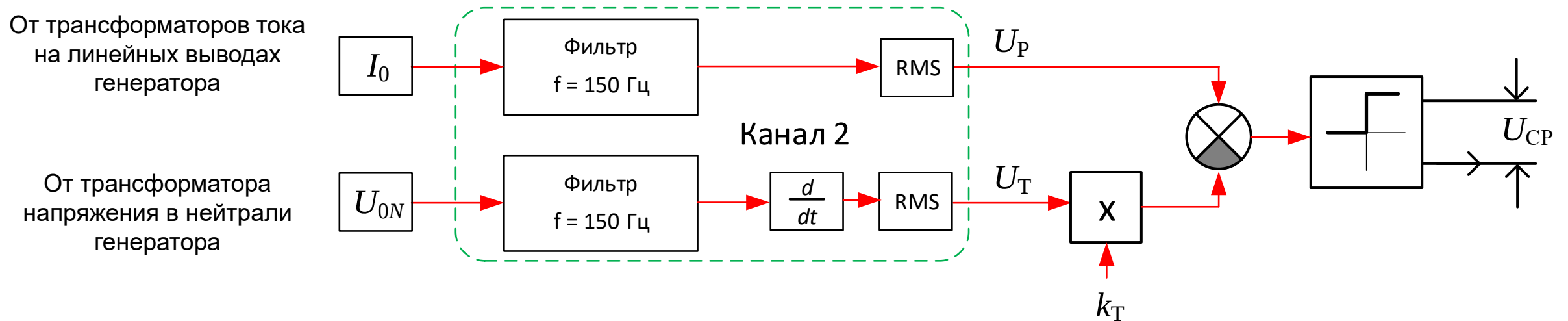
Два канала преобразования сигналов:

- канал 1 для гармоник при устойчивом замыканий ($\nu > 5$) и при перемежающемся замыкании ($5 < \nu < 30$);



Два канала преобразования сигналов:

- канал 2 для третьей гармоники





ЭКРА

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ