

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт. Энергетический факультет.
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, _____
(должность)

_____/_____/_____
(подпись и печать) (И.О. Фамилия)

« ____ » _____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____/ И.М. Кирпичникова /

« ____ » _____ 2020 г.

Расчёты условий возникновения феррорезонанса для различных схем и компоновок РУ 330-500 кВ. Рекомендации по компоновке схем ОРУ для снижения влияния феррорезонанса

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ НАУЧНАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 13.04.02.2020.232 ПЗ ВКР

Руководитель, доцент

_____/ А.Н. Андреев /

« ____ » _____ 2020 г.

Автор работы

студент группы П-282

_____/ А.В. Шантарин /

« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролёр, доцент

_____/ А.Н. Андреев /

« ____ » _____ 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт. Энергетический факультет
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»
Направление 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ / И.М. Кирпичникова /

« ___ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную научную работу магистра

Шантарина Александра Викторовича

Группа П-282

1. Тема выпускной квалификационной работы «Расчёты условий возникновения феррорезонанса для различных схем и компоновок РУ 330-500 кВ. Рекомендации по компоновке схем ОРУ для снижения влияния феррорезонанса» утверждена приказом по университету от « ___ » _____ 2020 г. № _____

2. Срок сдачи студентом законченной работы « ___ » _____ 2020 г.

3. Исходные данные к работе

- типовые схемы РУ 330-500 кВ;
- компоновки типовых схем, где возможен феррорезонанс;
- напряжение питания, ёмкости ошинок и оборудования РУ, ёмкости делителей напряжения силовых выключателей;
- параметры трансформатора напряжения: сопротивление обмотки высокого напряжения, аппроксимация стали сердечника, количество витков обмотки ВН.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке

- аппроксимация стали сердечника ТН и построение вебер-амперной характеристики для НКФ-330 и НКФ-500;
- составление однофазной схемы замещения для расчёта феррорезонансных процессов, нахождение параметров схемы и расчёт переходных процессов в среде MathCad;

- определение влияния феррорезонансных перенапряжений на работу современных микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) и способы защиты МУРЗ от перенапряжений;

- рекомендации по компоновке РУ 330-500 для предотвращения возникновения феррорезонанса.

5. Перечень графического материала

Чертежи в данной работе не создавались.

6. Дата выдачи задания « ____ » _____ 2020 г.

Руководитель работы

(подпись)

Задание принял к исполнению

(подпись студента)

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Дата завершения этапа	Отметка руководителя о выполнении
Сбор необходимой информации по теме ВКР	01.03.20	
Представление экспериментальной кривой намагничивания сердечника ТН в виде аппроксимационной кривой	01.04.20	
Составление схемы замещения для расчёта феррорезонансных процессов и её расчёт для РУ 330-500	01.05.20	
Сравнение схем РУ 330 кВ и РУ 500 кВ по кратности перенапряжений и токовым перегрузкам	20.05.20	
Оформление пояснительной записки	01.06.20	

Заведующий кафедрой

_____ / И.М. Кирпичникова /

Руководитель работы

_____ / А.Н. Андреев /

Студент

_____ / А.В. Шантарин /

АННОТАЦИЯ

Шантарин А.В. – Расчёты условий возникновения феррорезонанса для различных схем и компоновок РУ 330-500 кВ. Рекомендации по компоновке схем ОРУ для снижения влияния феррорезонанса. – Челябинск: ЮУрГУ, ЭФ, П-282, 2020 г., стр. 52, илл. 38, табл. 10, Список литературы – 15 наименований.

В выпускной квалификационной научной работе были рассчитаны условия возникновения феррорезонанса в различных компоновках схем РУ 330-500 кВ. Было определено, что основным фактором возникновения феррорезонансных процессов является наличие феррорезонансного контура, состоящего из ёмкости делителей напряжения выключателей и нелинейной индуктивности электромагнитного трансформатора напряжения (ТН).

На первом этапе рассматривалась задача аппроксимирования кривой намагничивания стали трансформатора напряжения, где был применён метод гиперболического синуса. Далее составлялась схема замещения. Для РУ 330 кВ и РУ 500 кВ – схема замещения одинакова. По данной схеме был произведён расчёт переходного процесса при отключении холостых ошинок силовым выключателем. Расчёт выполнялся в среде MathCad. Были построены графики напряжения и тока ТН и по ним определены коэффициенты перенапряжений и перегрузки по току ТН. В конце были даны рекомендации по снижению возникновения феррорезонанса в схемах РУ 330-500.

					П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Расчёты условий возникновения феррорезонанса для различных схем и компоновок РУ 330-500 кВ. Рекомендации по компоновке схем ОРУ для снижения влияния феррорезонанса</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>	<i>Шантарин</i>						3	52
<i>Провер.</i>	<i>Андреев</i>					ЮУрГУ Кафедра «ЭССиСЭ»		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Андреев</i>							
<i>Утв</i>	<i>Кирпичникова</i>							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ В(Н) И ВЕБЕР-АМПЕРНОЙ $\Psi(I)$ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДУКТИВНОСТИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ.....	6
2 ОБЩАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ФЕРРОРЕЗОНАНСА. РАСЧЁТ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В РУ 330-500 КВ....	12
2.1 Составление схемы замещения и уравнений, описывающих схему	12
2.2 Расчёт схемы замещения для типовых РУ 330 кВ.....	13
2.3 Расчёт схемы замещения для типовых РУ 500 кВ.....	30
3 ВЛИЯНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ (МУРЗ)...	49
3.1 Влияние перенапряжений на МУРЗ. Способы защиты МУРЗ от перенапряжений	49
3.2 Влияние на МУРЗ гармоник в измеряемом токе и напряжении.....	50
3.3 Рекомендации для предотвращения феррорезонансных процессов в РУ 330-500.	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	51
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	52

					П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		4

ВВЕДЕНИЕ

Надёжное электроснабжение потребителей требует необходимости исследования режимов работы электрических систем, приводящих к повреждению электрооборудования и недоотпуску электроэнергии, с целью разработки мероприятий по их предупреждению и предотвращению. Одной из главных причин возникновения таких режимов являются феррорезонансные перенапряжения.

Феррорезонансные перенапряжения возникают в электрических сетях при оперативных переключениях, неполнофазных включениях, перемежающихся дуговых замыканиях на землю при взаимодействии нелинейных индуктивностей намагничивания магнитопроводов трансформаторов с ёмкостями электрооборудования электрических систем. При феррорезонансе возникают длительные перенапряжения на шинах распределительных устройств, опасные для разрядников и ОПН, и токовые перегрузки обмоток трансформаторов напряжения.

Феррорезонанс проявляется как в сетях 6-35 кВ, так и в сетях 110-500 кВ. Наиболее опасным является феррорезонанс в сетях 110-500 кВ. Он протекает в схемах при отключении воздушными или элегазовыми выключателями, содержащими ёмкостные делители напряжения, секций шин с электромагнитными ТН.

Возникновение и протекание феррорезонансных перенапряжений определяется параметрами феррорезонансных схем: параметрами воздушных линий, набором и характеристиками электрического оборудования станций и подстанций. Для исследования протекания процессов в феррорезонансных схемах актуальной является задача анализа влияния параметров расчётных феррорезонансных схем на характер переходных процессов и величин перенапряжений и токовых перегрузок.

Для описания феррорезонансных процессов с нелинейными элементами в электрических схемах и составления расчётных схем замещения необходимо использовать ряд допущений, так как невозможно рассматривать все факторы, влияющие на процесс. Принятые допущения заключаются в следующем:

- распределенные активные сопротивления, индуктивности, емкости электрооборудования считаются линейными элементами и рассматриваются как сосредоточенные параметры;

- обмотка высшего напряжения (ВН) трансформатора напряжения может быть замещена эквивалентной схемой, состоящей из нелинейного элемента, определяющего связь между потокосцеплением и током, и постоянного активного сопротивления, заменяющего тепловые потери в меди обмотки.

- потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводах трансформаторов напряжения не учитываются.

					П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

1 ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ $B(H)$ И ВЕБЕР-АМПЕРНОЙ $\Psi(I)$ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДУКТИВНОСТИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Феррорезонансные явления возникают в контуре с нелинейной индуктивностью трансформатора напряжения и ёмкостью электрооборудования той или иной схемы. Как известно, в РУ 330 и 500 кВ используются два типа трансформаторов напряжения: электромагнитные (типа НКФ) и трансформаторы, содержащие ёмкостные делители напряжения (типа НДЕ). Очевидно, что трансформаторы второго типа для наших исследований не подходят, т.к. они не образуют контура для протекания феррорезонансных процессов. Поэтому для дальнейших расчётов феррорезонансных явлений берутся трансформаторы напряжения НКФ - 330 и НКФ-500.

В расчётах феррорезонансных явлений как в схемах РУ 330 кВ, так и в РУ 500 кВ во всех схемах замещения трансформатор напряжения представляется индуктивностью с нелинейной вебер-амперной характеристикой. Вебер-амперная характеристика в свою очередь, строится по кривой намагничивания сердечника трансформатора напряжения. Для построения данных кривых используют различные методы аппроксимации экспериментальных кривых намагничивания, т.е. нахождение функции, которая очень близко повторяет экспериментальную кривую. В данной выпускной работе воспользуемся методом гиперболического синуса [1, формула 2].

$$H(B) = \alpha_c \cdot \text{sh}(\beta_c \cdot B) + \chi_c \cdot B, \quad (1.1)$$

где α_c , β_c и χ_c – коэффициенты аппроксимации, определяемые на основании экспериментальных характеристик.

В своей работе я воспользуюсь уже посчитанными коэффициентами аппроксимации [1, таблица, страница 41], взятыми для электротехнической стали Э330 (3413). При толщине листов магнитопровода трансформатора напряжения 0.35 мм по таблице находим: $\alpha_c = 3,397 \cdot 10^{-7}$, $\beta_c = 12,355$ и $\chi_c = 20,69$.

После подстановки в (формула 1.1) данных коэффициентов получаем зависимость $H(B)$ (кривую намагничивания) для стали марки 3413 (формула 1.2).

$$H(B) = 3,397 \cdot 10^{-7} \cdot \text{sh}(12,355B) + 20,69B, \quad (1.2)$$

Данная аппроксимированная кривая не учитывает перегиб на начальном участке экспериментальной кривой намагничивания. Но этого и не требуется, так как рабочий диапазон магнитных индукций трансформаторов напряжения лежит выше этого участка (Рисунок 1.1).

					П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

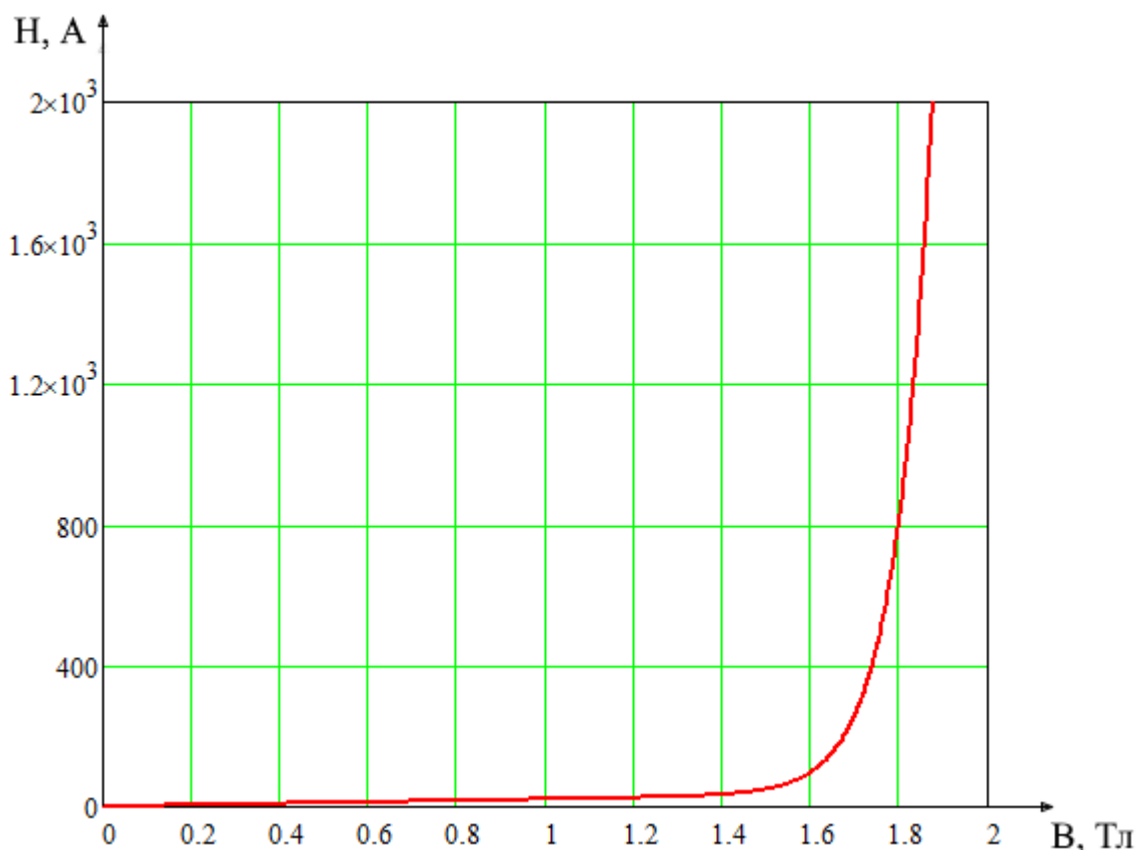


Рисунок 1.1 – Кривая намагничивания сердечника трансформатора напряжения

Зная характеристику $H(B)$ и геометрические размеры сердечника трансформатора НКФ-330 (для НКФ-500 магнитопровод имеет те же размеры, что и НКФ-330), можно построить вебер-амперную характеристику, т.е. зависимость тока от потокосцепления.

Геометрические размеры сердечника, такие как поперечное активное сечение магнитопровода и средняя линия ярем и сердечника, по которой проходит магнитный поток в [2, таблица 4.1]. Здесь сечения ярма и сердечника немного различаются, поэтому примем за активное сечение магнитопровода среднее значение двух сечений:

$$S_{\text{сеч}} = \frac{S_{\text{сечяр}} + S_{\text{сечст}}}{2} = \frac{93,3 + 91,8}{2} = 92,55 \text{ см}^2,$$

где $S_{\text{сечяр}} = 93,3 \text{ см}^2$ – сечение ярма магнитопровода,

$S_{\text{сечст}} = 91,8 \text{ см}^2$ сечение стержня магнитопровода.

Далее найдём длину пути прохождения магнитного потока. Очевидно, что длина будет складываться из средних линий стержней и ярем сердечника (Рисунок 1.2). Определим длину каждой. Средняя линия ярма по [2, таблица 4.1]

$C = 430$ мм. Для стержня путём нехитрых вычислений, данных из той же таблицы, средняя линия равна

$$l_{CT} = l_C + h_{я} = 400 + 91 = 531 \text{ мм},$$

где l_C – высота окна магнитопровода,
 $h_{я}$ – высота ярма.

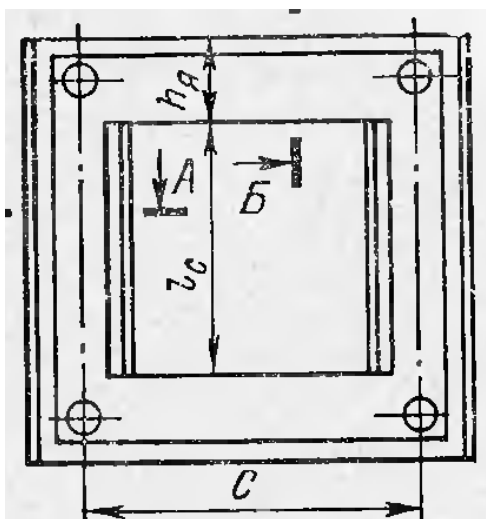


Рисунок 1.2 – Габаритный чертёж сердечника трансформаторов НКФ-330 и НКФ-500

Суммарная длина пути прохождения магнитного потока равна

$$l_{СУМ} = 2 \cdot C + 2 \cdot l_{CT} = 2 \cdot 430 + 2 \cdot 531 = 1922 \text{ мм}.$$

Для построения вебер-амперной характеристики воспользуемся следующим способом. Задаём несколько значений индукции B (для удобства возьмём с одинаковым интервалом $B_i = 0.1$ Тл) и для каждого значения по кривой намагничивания ищем напряженности поля, а затем и токи на участке $l_{СУМ}$.

Потокосцепления рассчитаем по формуле

$$\Psi_i = B_i \cdot S \cdot w \text{ [Вб]},$$

где $S = S_{СЕЧ}$ – активное сечение магнитопровода,
 w – количество витков первичной обмотки ТН.

Токи на пути $l_{СУМ}$ по закону полного тока рассчитаем по формуле

$$I = \frac{H_i \cdot l_{СУМ}}{w} \text{ [А]},$$

где $l = l_{СУМ}$ – длина пути прохождения магнитного потока.

Для трансформатора НКФ-330 количество витков первичной обмотки посчитаем по формулам, приведённым в [3, страница 34]. После расчёта было определено, что количество витков первичной обмотки $w = 55250$ витков. Для НКФ-500 кВ количество витков первичной обмотки $w = 83720$ витков.

После всех расчётов по полученным точкам строим экспериментальную кривую $i_1(\psi_1)$ (Рисунок 1.3) для трансформатора НКФ-330.

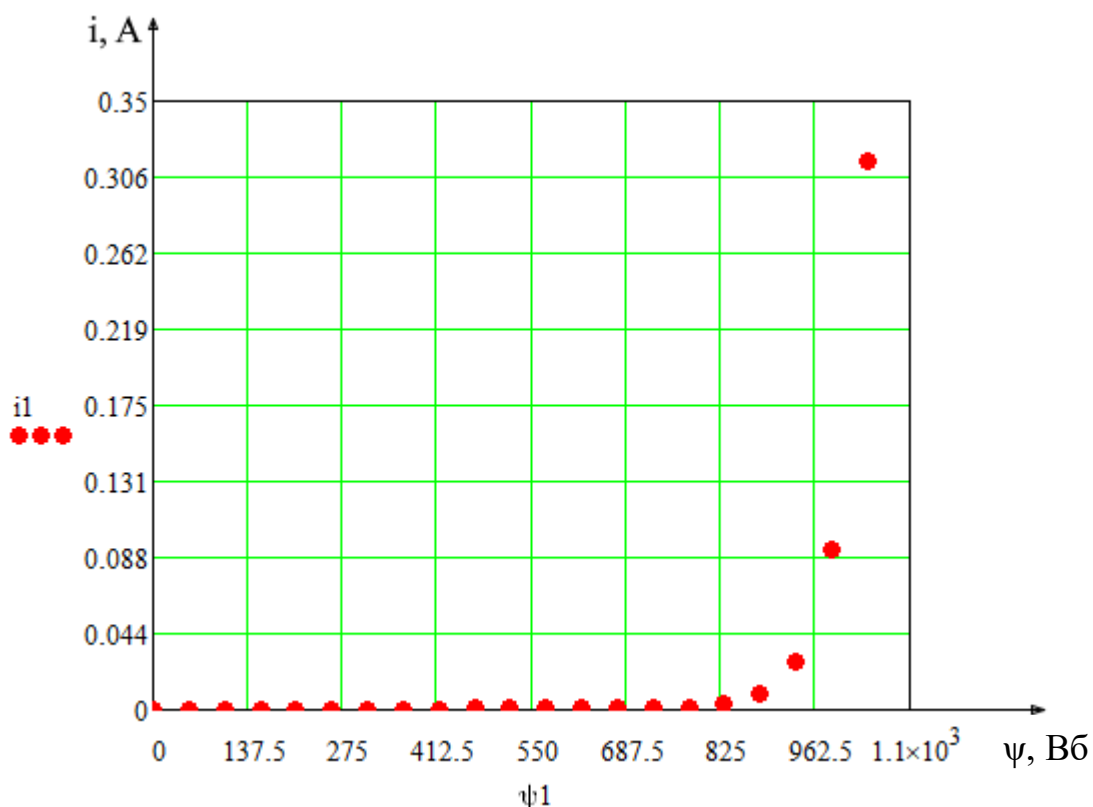


Рисунок 1.3 – Экспериментальная вебер-амперная характеристика $i_1(\psi_1)$ сердечника трансформатора напряжения НКФ-330

Данную характеристику необходимо аппроксимировать, чтобы в дальнейшем использовать в аналитических расчётах. Аппроксимировать будем методом гиперболического синуса (формула 1.1).

$$i(\psi) = a \cdot \text{sh}(b \cdot \psi) \quad (1.1)$$

где – $a = 4,247 \cdot 10^{-11}$, $b = 0,022$ – коэффициенты аппроксимации, определяемые на основе экспериментальной характеристики.

Построим аппроксимированную кривую и сравним с исходной (Рисунок 1.4).

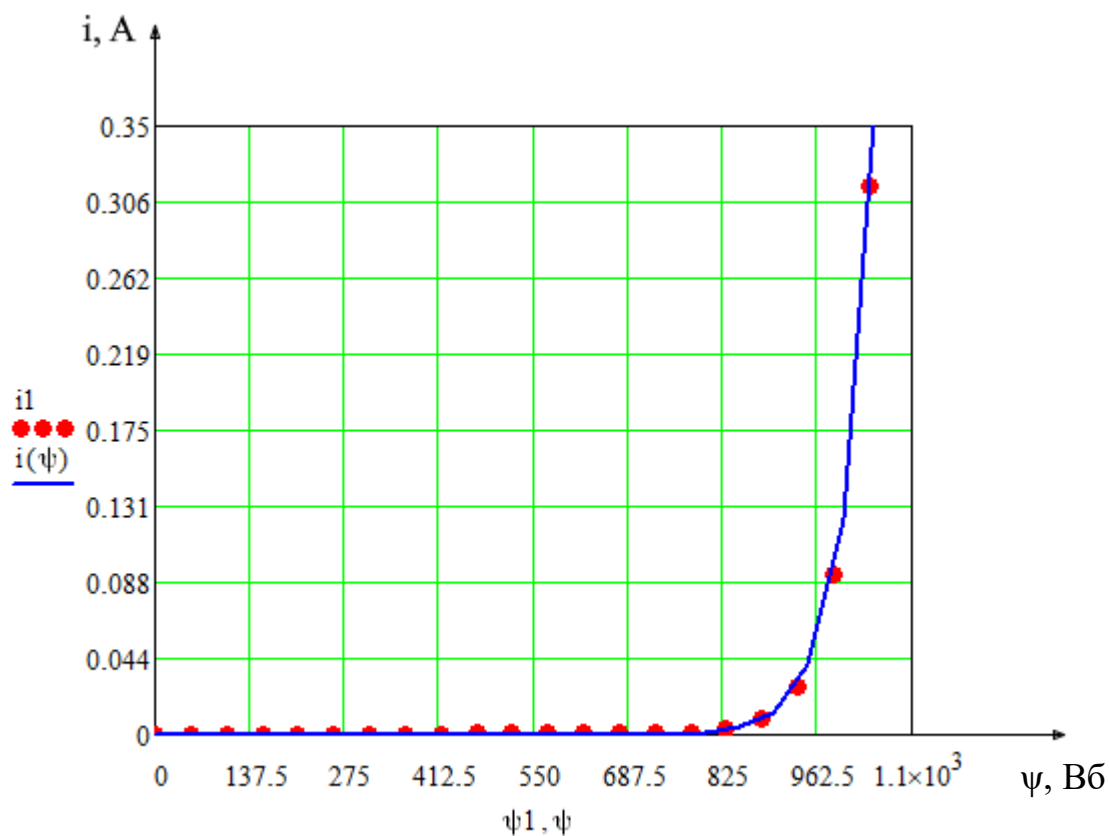


Рисунок 1.4 – Сравнение аппроксимированной вебер-амперной характеристики $i(\psi)$ с экспериментальной $i_1(\psi_1)$ для НКФ-330

Для трансформатора НКФ-500 экспериментальная и аппроксимирующая кривые построены на рисунке 1.5.

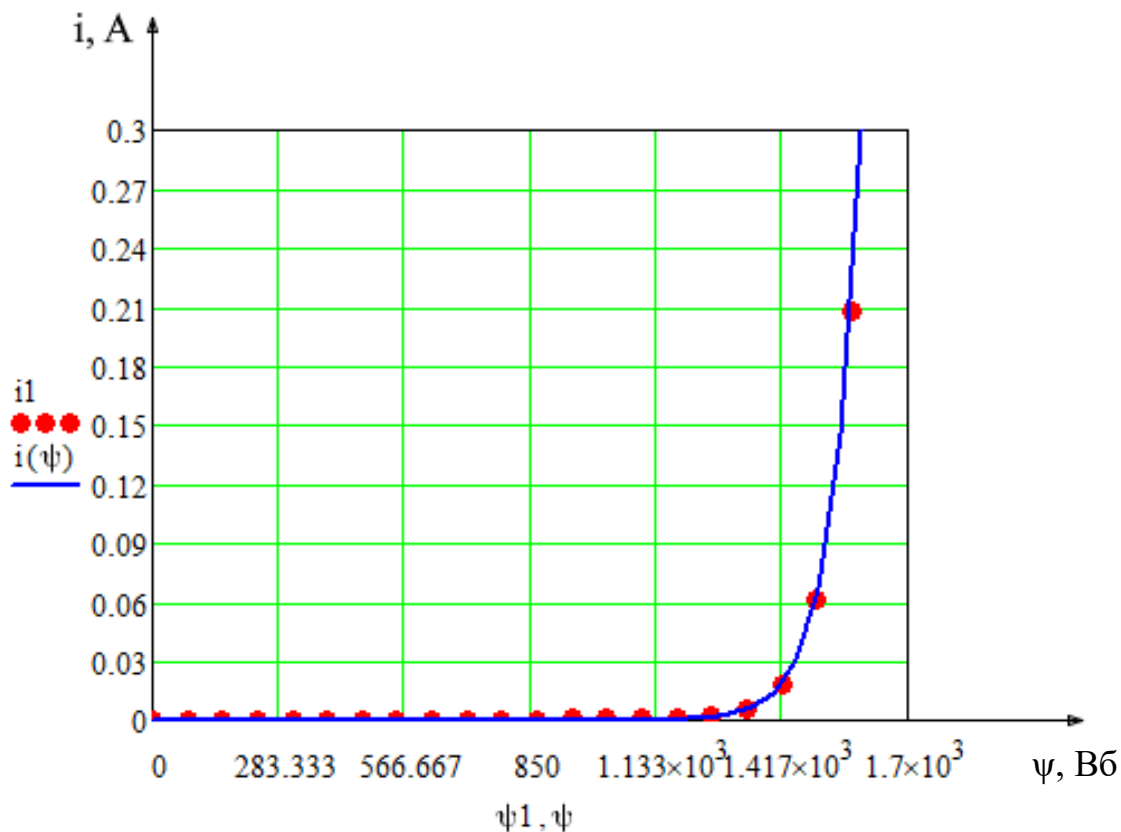


Рисунок 1.5 – Сравнение аппроксимированной вебер-амперной характеристики $i(\psi)$ и экспериментальной кривой $i_1(\psi_1)$ для НКФ-500

Зависимость $i(\psi)$ НКФ-500 примет вид:

$$i(\psi) = a \cdot \text{sh}(b \cdot \psi) \quad (1.2)$$

где – $a = 9,351 \cdot 10^{-12}$, $b = 0,016$ – коэффициенты аппроксимации, определяемые на основе экспериментальной характеристики.

Из графиков видно, что аппроксимированные кривые почти в точности повторяют экспериментальные. Отсюда следует, что зависимости $i(\psi)$ для обоих трансформаторов можно использовать для дальнейших расчётов.

Выводы по разделу 1

В данном разделе была получена кривая намагничивания сердечника трансформаторов НКФ-330 и НКФ -500 путём аппроксимирования экспериментальной кривой методом гиперболического синуса. По данной кривой были построены экспериментальные вебер-амперные характеристики обоих трансформаторов, где далее были аппроксимированы методом гиперболического синуса. По экспериментальным характеристикам были найдены коэффициенты аппроксимации и были построены аппроксимированные кривые $i(\psi)$.

2 ОБЩАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ФЕРРОРЕЗОНАНСА. РАСЧЁТ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В РУ 330-500 КВ

2.1 Составление схемы замещения и уравнений, описывающих схему

Для расчёта феррорезонансных процессов требуется схема замещения. Возьмём за основу схему из [4]. Данная схема (Рисунок 2.1) представляет собой простейший колебательный контур, содержащий нелинейную индуктивность. Эта схема замещения подходит как для схем РУ 330 кВ, так и для РУ 500 кВ. Отличаться схемы РУ будут параметрами схемы замещения.

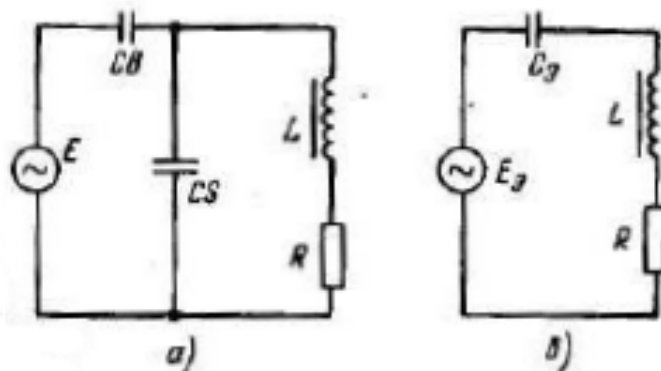


Рисунок 2.1.1 – Однофазная схема замещения для расчёта феррорезонанса в схемах РУ 330 кВ (РУ 500 кВ) с ёмкостными делителями воздушных выключателей и электромагнитными трансформаторами напряжения: *а* – исходная схема замещения, *б* – эквивалентная; $C_S = C_3$ – суммарная ёмкость отключаемого оборудования относительно земли; C_B – суммарная ёмкость делителей напряжения воздушных выключателей; R и L – активное сопротивление обмотки ВН и нелинейная индуктивность намагничивания одного трансформатора напряжения соответственно.

Эквивалентные ЭДС E_9 и ёмкость C_9 схемы равны:

$$E_9 = E \cdot C_9; \quad (2.1.1)$$

$$C_9 = \frac{C_B}{C_B + C_3}. \quad (2.1.2)$$

Так данная схема содержит в себе нелинейный элемент, то переходные процессы в схеме будут описываться нелинейными дифференциальными уравнениями первого порядка. Уравнения, описывающие схему:

$$\frac{d\psi}{dt} = -R \cdot i - u_C + e_9(t); \quad (2.1.3)$$

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C_3} i; \quad (2.1.4)$$

$$i = a \cdot \sinh(b \cdot \psi), \quad (2.1.5)$$

где a , b – коэффициенты аппроксимации экспериментальных кривых.

2.2 Расчёт схемы замещения для типовых РУ 330 кВ

Согласно [4], типовыми схемами РУ 330 кВ являются:

- блок (линия-трансформатор) с выключателем (330-3Н);
- треугольник (330-6Н);
- четырёхугольник (330-7);
- трансформаторы-шины с присоединением линий через два выключателя (330-15);
- трансформаторы-шины с полуторным присоединением (330-16);
- полуторная схема (330-17).

Из этого списка, согласно [5], наиболее подвержены феррорезонансу следующие схемы: 330-7, 330-15, 330-16, 330-17.

В первой схеме (330-3Н) феррорезонанс не возникает по причине того, что трансформатор напряжения не присоединён непосредственно к секциям шин, так как в данной схеме секции шин отсутствуют, и, следовательно, не образуется контура для протекания феррорезонансных процессов.

Вторая схема (330-6Н) редко используется в наши дни или используется как первый этап запуска подстанции с дальнейшей реконструкцией РУ, поэтому рассматривать мы её не будем.

Проверим условия возникновения феррорезонанса для остальных схем. Для примера рассчитаем схему 330-7 [5] (Рисунок 2.2.1).

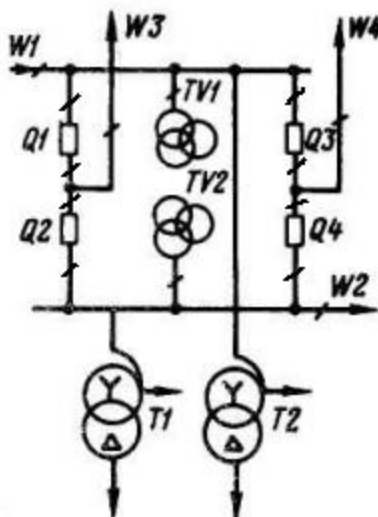


Рисунок 2.2.1 – Принципиальная схема «четырёхугольник» (330-7), где возможен феррорезонанс

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Как было сказано ранее, для возникновения феррорезонанса необходимо наличие феррорезонансного контура. В данной схеме такой контур возникает при отключении трансформатором TV1 1-ой секции шин (W1).

Необходимо найти закон изменения напряжения на полюсах выключателя $u_c(t)$, напряжения на трансформаторе $u_l(t)$ и тока $i(t)$ в схеме и сравним с номинальными. Параметры схемы замещения необходимые для расчёта: сопротивление высшей обмотки напряжения ТН принимаем $R = 8500 \text{ Ом}$; вебер-амперная характеристика сердечника ТН $i(\psi) = a \cdot \sinh(b \cdot \psi)$. Ёмкости оборудования берём из расчёта на фазу. Ёмкость контактов одного выключателя $C_B = 1500 \text{ пФ}$ (для элегазовых выключателей) [6, п.5.6.5]. Ёмкость отключаемого оборудования РУ относительно земли C_3 возьмём из [6, таблица 5.2]. Для расчёта ёмкости ошиновки $C_{Ш}$ примем длину ошиновки 50 м. Эквивалентную ёмкость $C_Э$ рассчитаем по формуле (2.2). Ёмкость C_3 для схемы 330-7 будет равна:

$$C_3 = C_{Ш} + 3C_P + C_{ТН},$$

где $C_{Ш}$ – ёмкость ошиновки относительно земли, пФ;

C_P – ёмкость разъединителей относительно земли, пФ;

$C_{ТН}$ – ёмкость трансформатора напряжения относительно земли, пФ.

$$C_3 = 500 + 3 \cdot 180 + 400 = 1440 \text{ пФ}.$$

Полученные значения ёмкостей сведём в таблицу 2.2.1.

Таблица 2.2.1 – Расчётные значения ёмкостей оборудования

Наименование схемы	C_B , пФ	C_3 , пФ	$C_Э$, пФ
330-7	3000	1440	0,676

Расчёт схемы и построение графических зависимостей напряжений и тока вёлся в программе MathCad с помощью команды *rkfixed*. Полученные зависимости напряжений и тока показаны на рисунках 2.2.2, 2.2.3 и 2.2.4.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

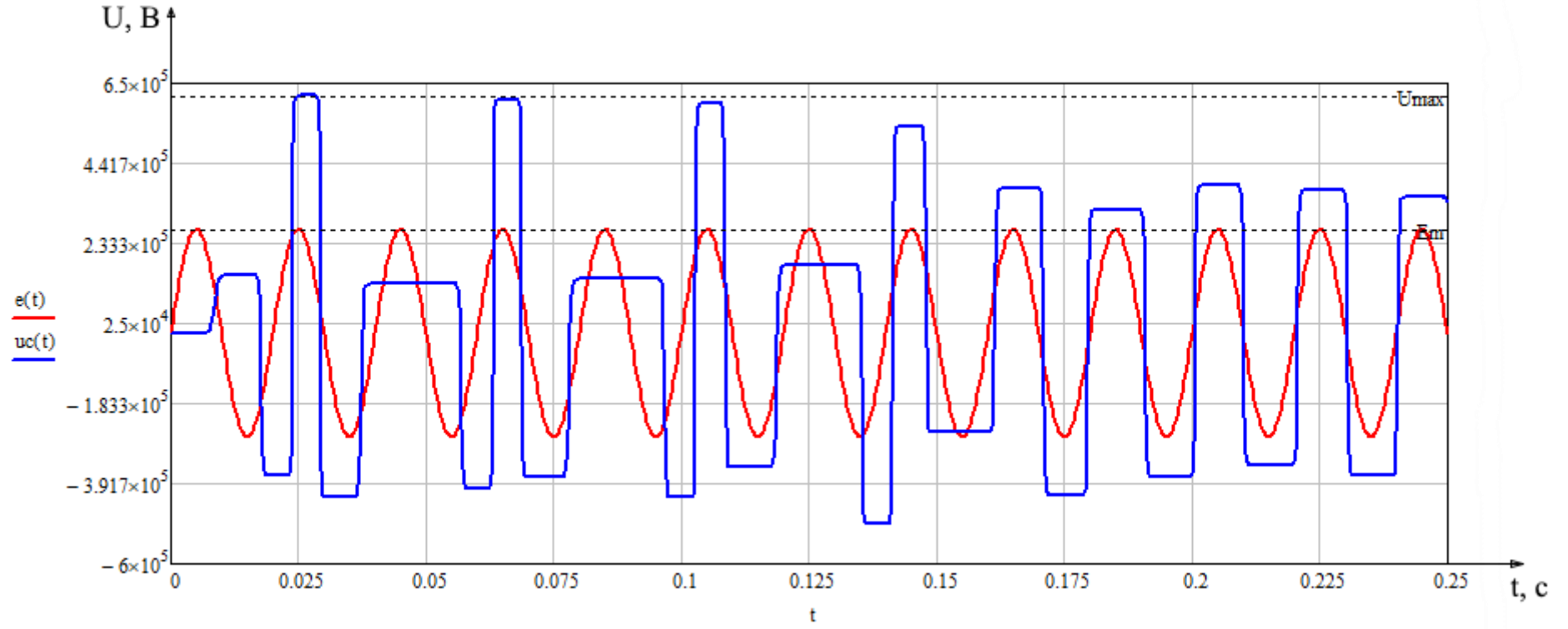


Рисунок 2.2.2 – Напряжение на ёмкостях выключателя при феррорезонансе

$U_{max} = 617,6$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 269,4$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

Коэффициент перенапряжения $K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{617,6}{269,4} = 2,292$.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подп.	
Дата	

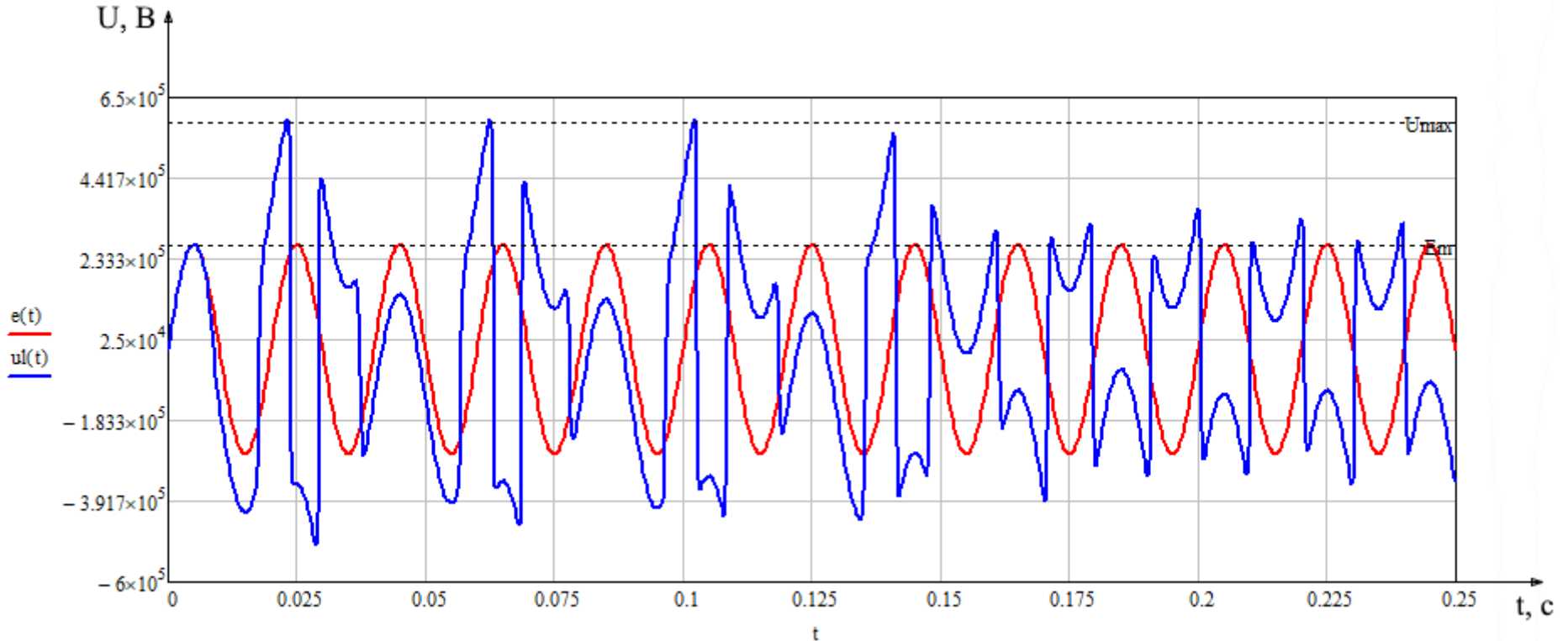


Рисунок 2.2.3 – Напряжение на ТН при феррорезонансе

$U_{max} = 587,4$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 269,4$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

Коэффициент перенапряжения $K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{587,4}{269,4} = 2,18.$

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

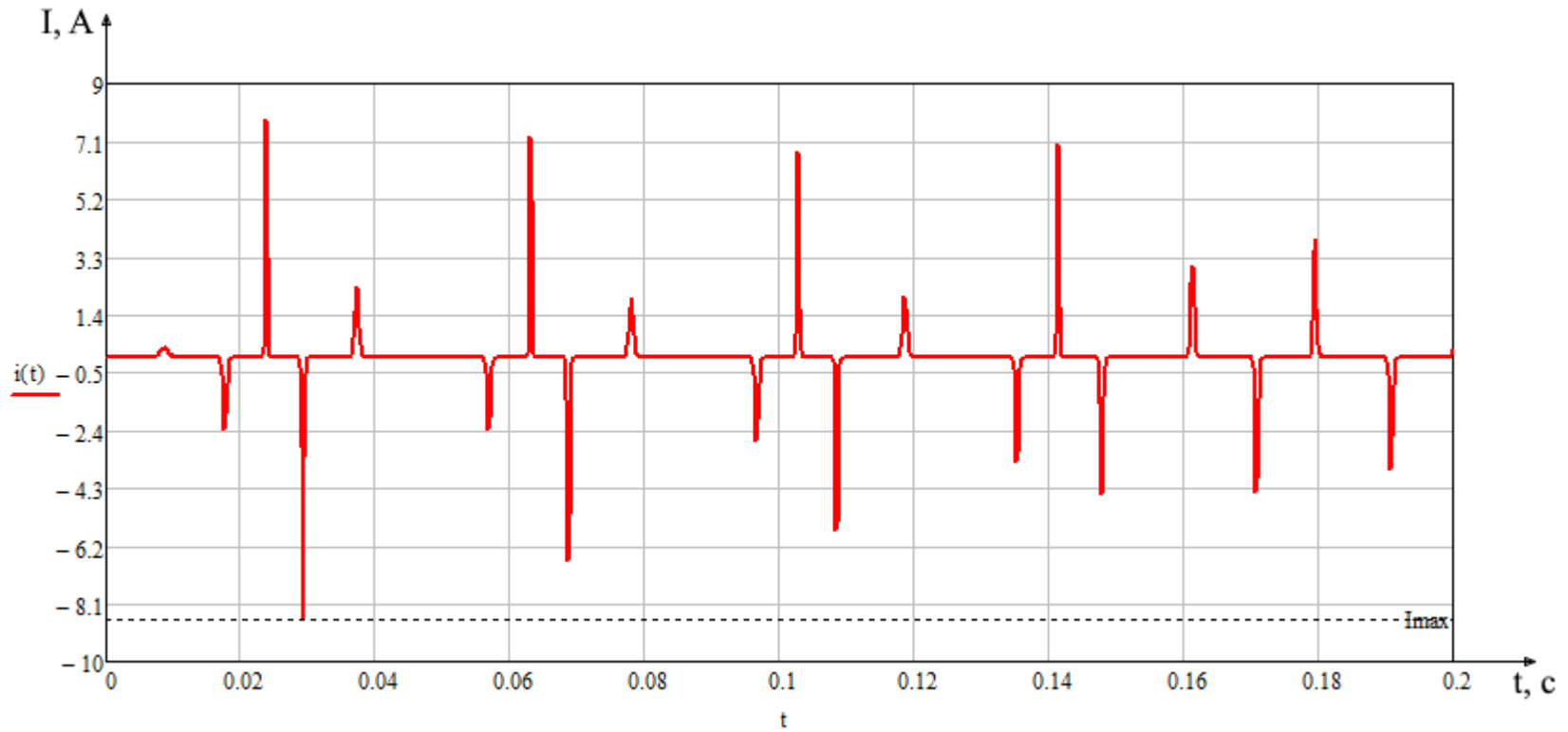


Рисунок 2.2.4 – Ток высоковольтной обмотки ТН при феррорезонансе

$I_{max} = 8,571$ А – максимальное значение тока ТН во время отключения ошиновки ОРУ.

Номинальный ток ТН составляет $I_n \approx 3$ мА.

Аналогичный расчёт проведём для следующей схемы 330-15 (Рисунок 2.2.5). В данной схеме феррорезонансный контур возникает при отключении трансформатором TV5 1-ой секции шин. Параметры схемы замещения те же самые, что и для схемы 330-7, за исключением ёмкости C_3 . Для данной схемы C_3 будет равно:

$$C_3 = C_{Ш} + 5C_P + C_{ТН},$$

где $C_{Ш}$ – ёмкость ошиновки относительно земли, пФ;

C_P – ёмкость разъединителей относительно земли, пФ;

$C_{ТН}$ – ёмкость трансформатора напряжения относительно земли, пФ.

$$C_3 = 500 + 5 \cdot 180 + 400 = 1800 \text{ пФ.}$$

Полученные значения ёмкостей сведём в таблицу 2.2.2.

Таблица 2.2.2 – Расчётные значения ёмкостей оборудования

Наименование схемы	C_B , пФ	C_3 , пФ	$C_Э$, пФ
330-15	6000	1800	0,714

Графические зависимости напряжений и тока показаны на рисунках 2.2.6, 2.2.7 и 2.2.8.

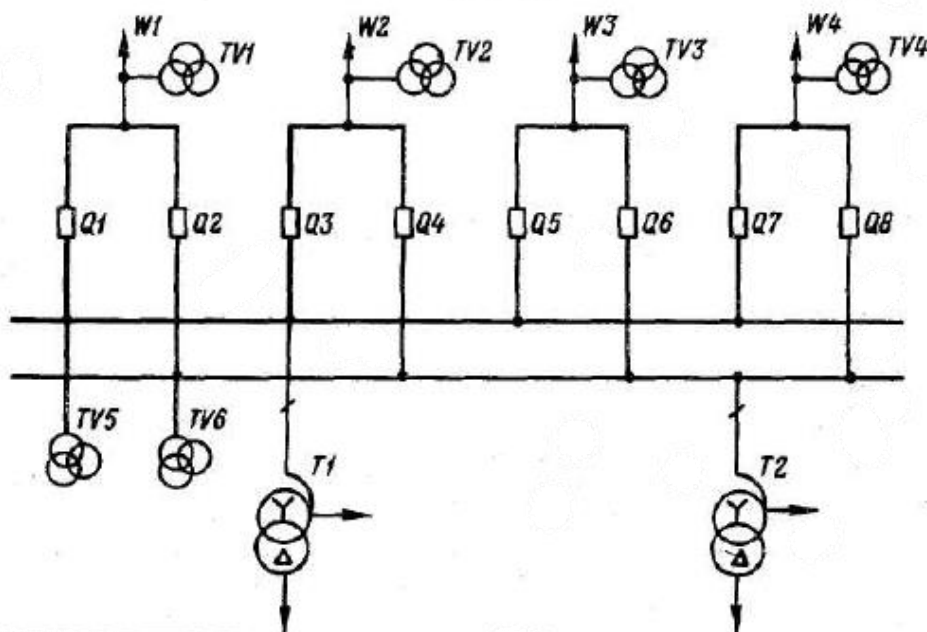


Рисунок 2.2.5 – Принципиальная схема «Трансформаторы-шины с присоединением линий через два выключателя» (330-15), где возможен феррорезонанс

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

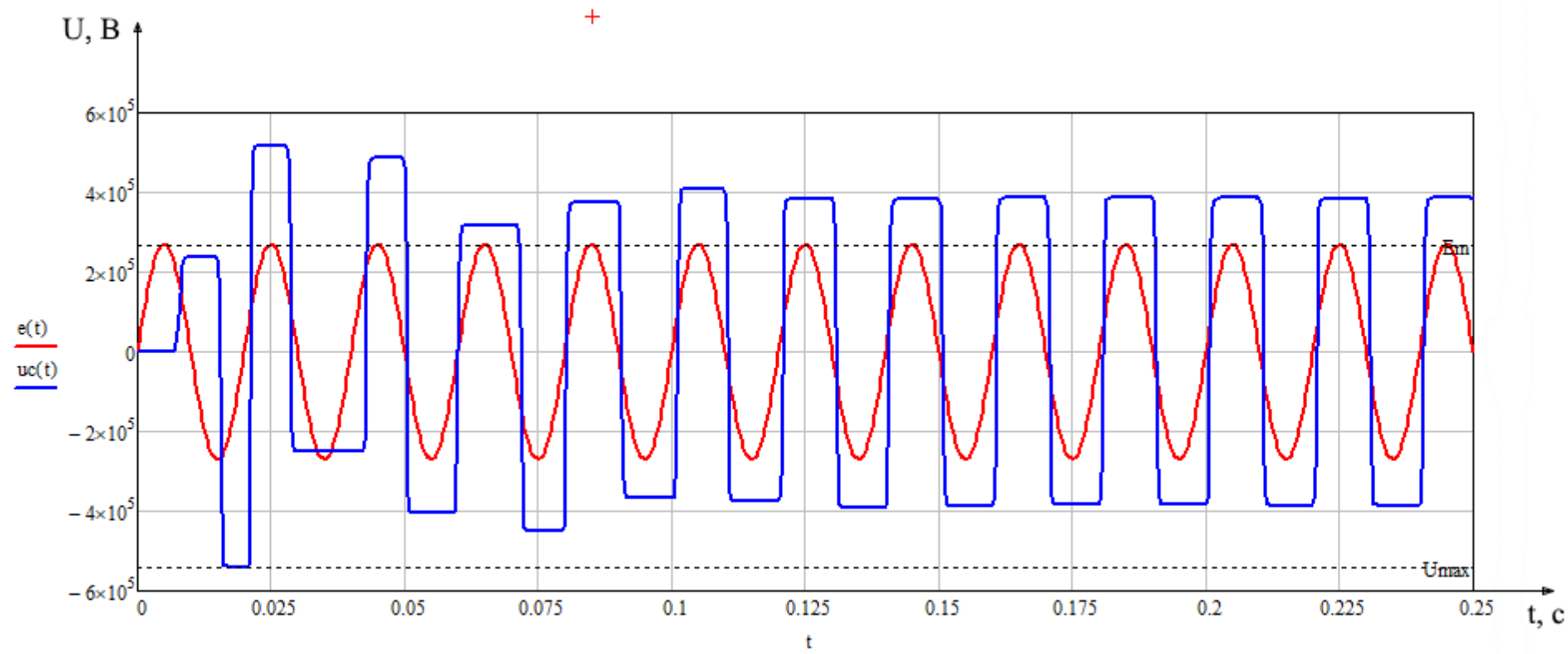


Рисунок 2.2.6 – Напряжение на ёмкостях выключателя при феррорезонансе

$U_{max} = 539,6 \text{ кВ}$ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 269,4 \text{ кВ}$ – амплитудное значение ЭДС сети.

Коэффициент перенапряжения $K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{539,6}{269,4} = 2,003.$

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подп.	
Дата	

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

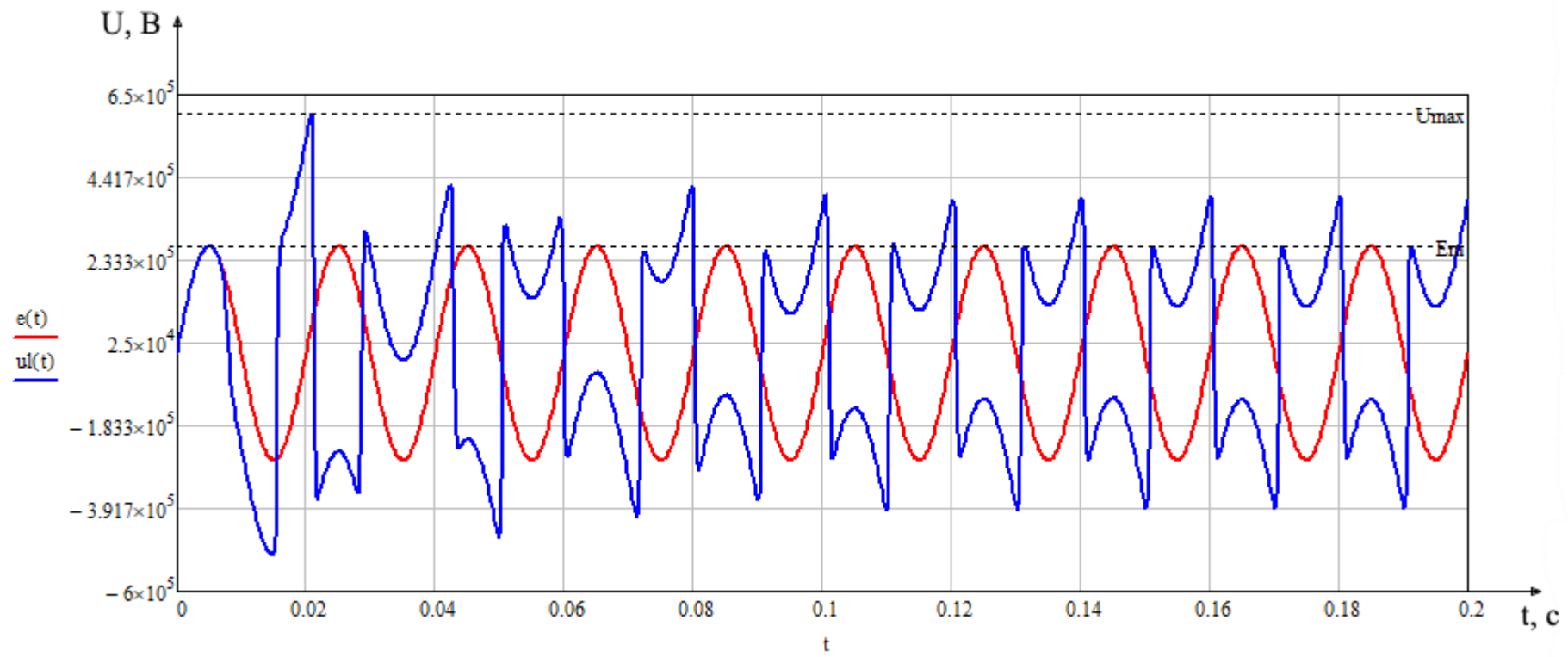


Рисунок 2.2.7 – Напряжение на ТН при феррорезонансе

$U_{max} = 603$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 269,4$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

$$\text{Коэффициент перенапряжения } K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{603}{269,4} = 2,238.$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

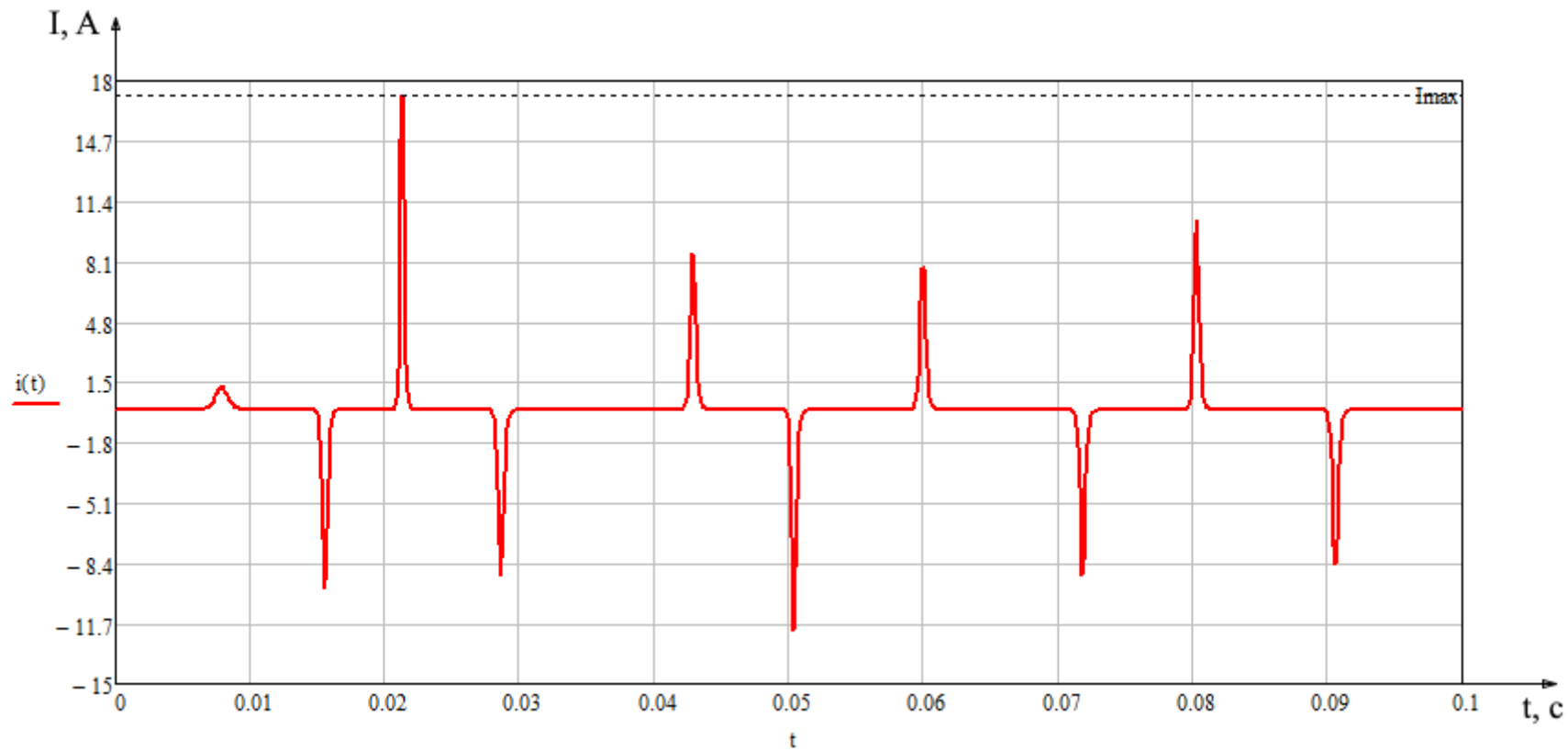


Рисунок 2.2.8 – Ток высоковольтной обмотки ТН при феррорезонансе

$i_{max} = 17,198$ А – максимальное значение тока ТН во время отключения ошиновки ОРУ.

Номинальный ток ТН составляет $I_n \approx 3$ мА.

Аналогичный расчёт проведём для следующей схемы 330-16 (Рисунок 2.2.9). В данной схеме феррорезонансный контур возникает при отключении трансформатором TV2 1-ой секции шин. Параметры схемы замещения те же самые, что и для схемы 330-7, за исключением ёмкости C_3 . Для данной схемы C_3 будет равно:

$$C_3 = C_{Ш} + 4C_P + C_{ТН},$$

где $C_{Ш}$ – ёмкость ошиновки относительно земли, пФ;

C_P – ёмкость разъединителей относительно земли, пФ;

$C_{ТН}$ – ёмкость трансформатора напряжения относительно земли, пФ.

$$C_3 = 500 + 4 \cdot 180 + 400 = 1620 \text{ пФ}.$$

Полученные значения ёмкостей сведём в таблицу 2.2.3.

Таблица 2.2.3 – Расчётные значения ёмкостей оборудования

Наименование схемы	C_B , пФ	C_3 , пФ	$C_Э$, пФ
330-16	4500	1620	0,735

Графические зависимости напряжений и тока показаны на рисунках 2.2.10, 2.2.11 и 2.2.12.

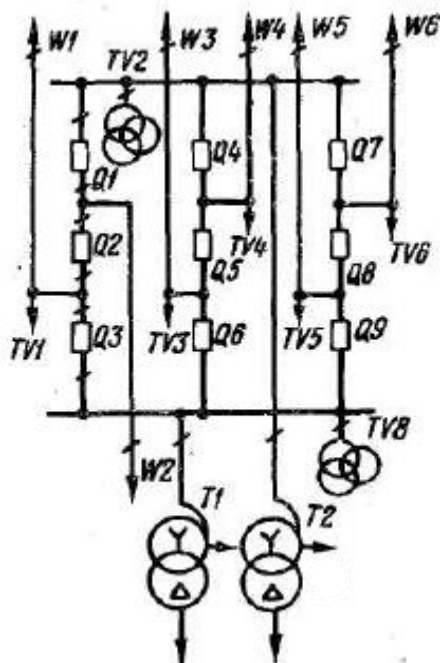


Рисунок 2.2.9 – Принципиальная схема «Трансформаторы-шины с полуторным присоединением линий» (330-16), где возможен феррорезонанс

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подл.	
Дата	

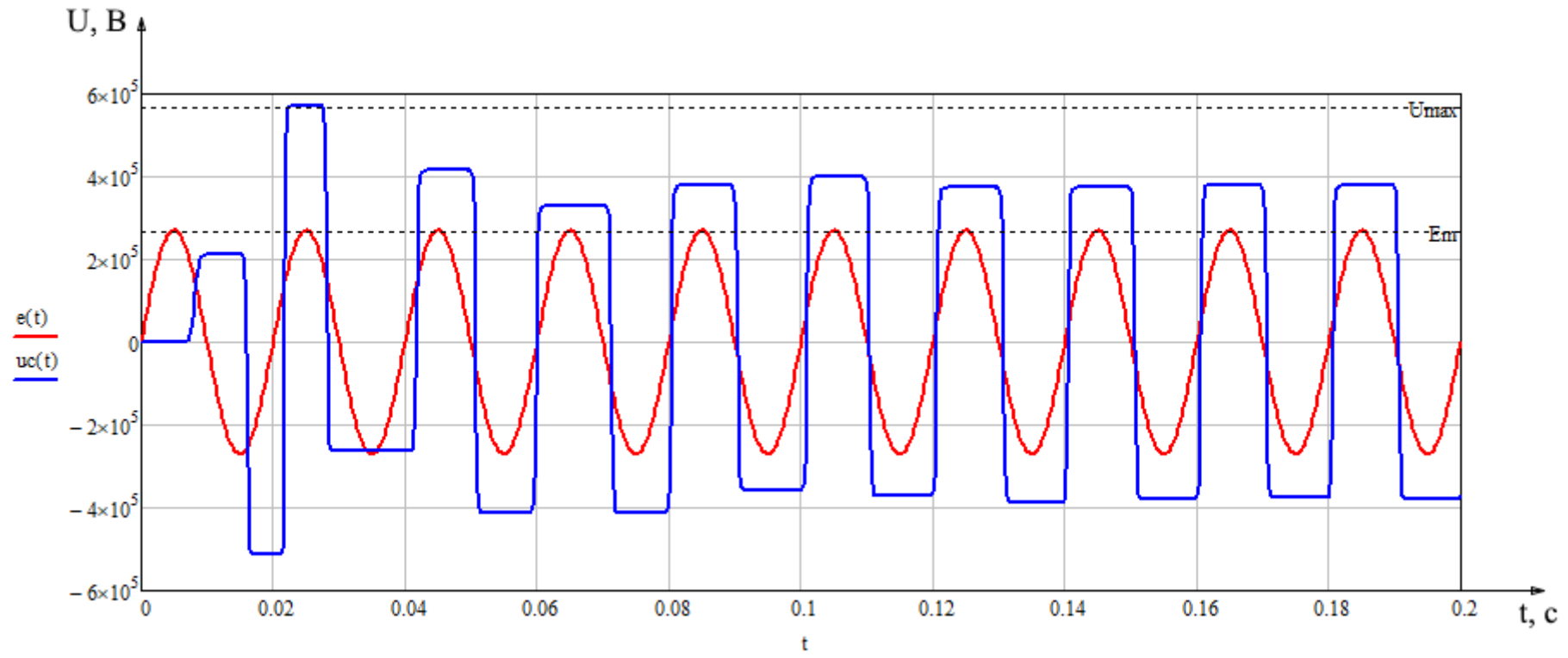


Рисунок 2.2.10 – Напряжение на ёмкостях выключателя при феррорезонансе

$U_{max} = 570,4$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 269,4$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

Коэффициент перенапряжения $K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{570,4}{269,4} = 2,117.$

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

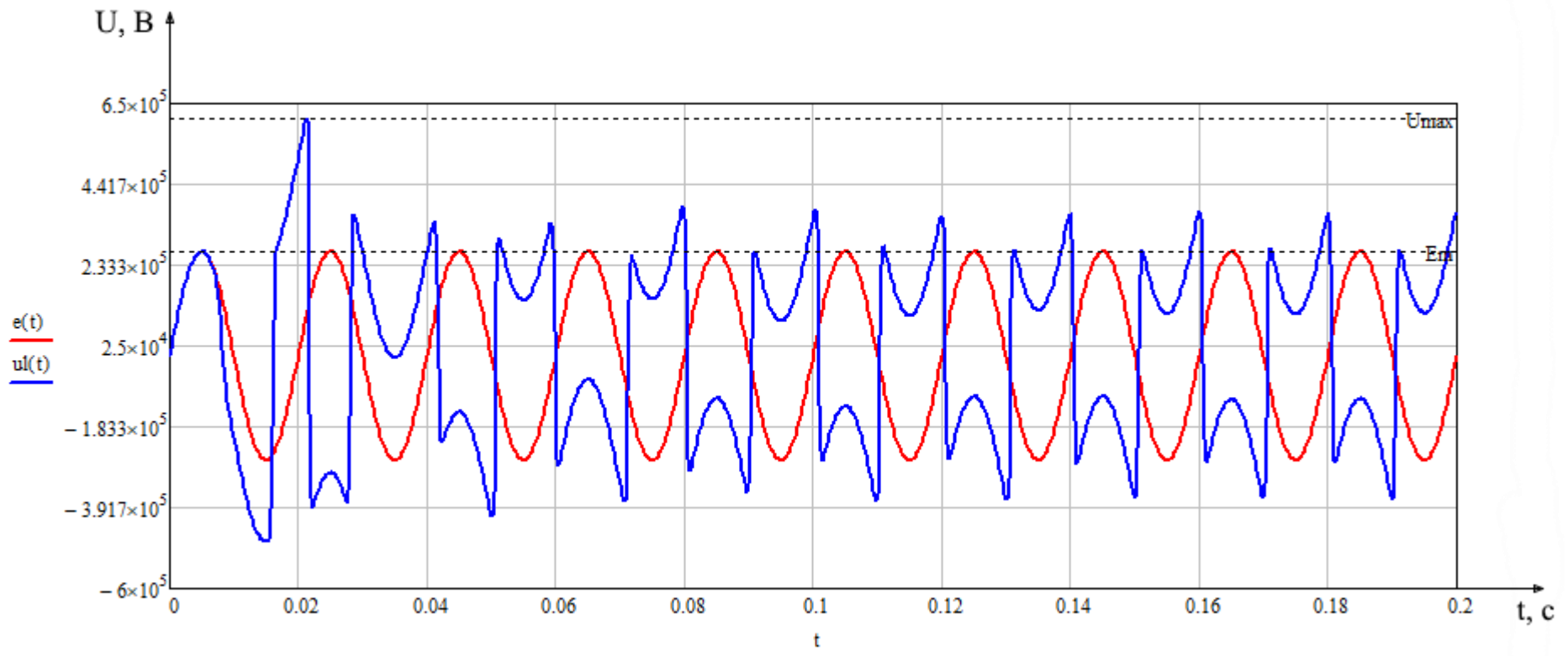


Рисунок 2.2.11 – Напряжение на ТН при феррорезонансе

$U_{max} = 613,9$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 269,4$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

Коэффициент перенапряжения $K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{613,9}{269,4} = 2,278.$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подп.	
Дата	

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

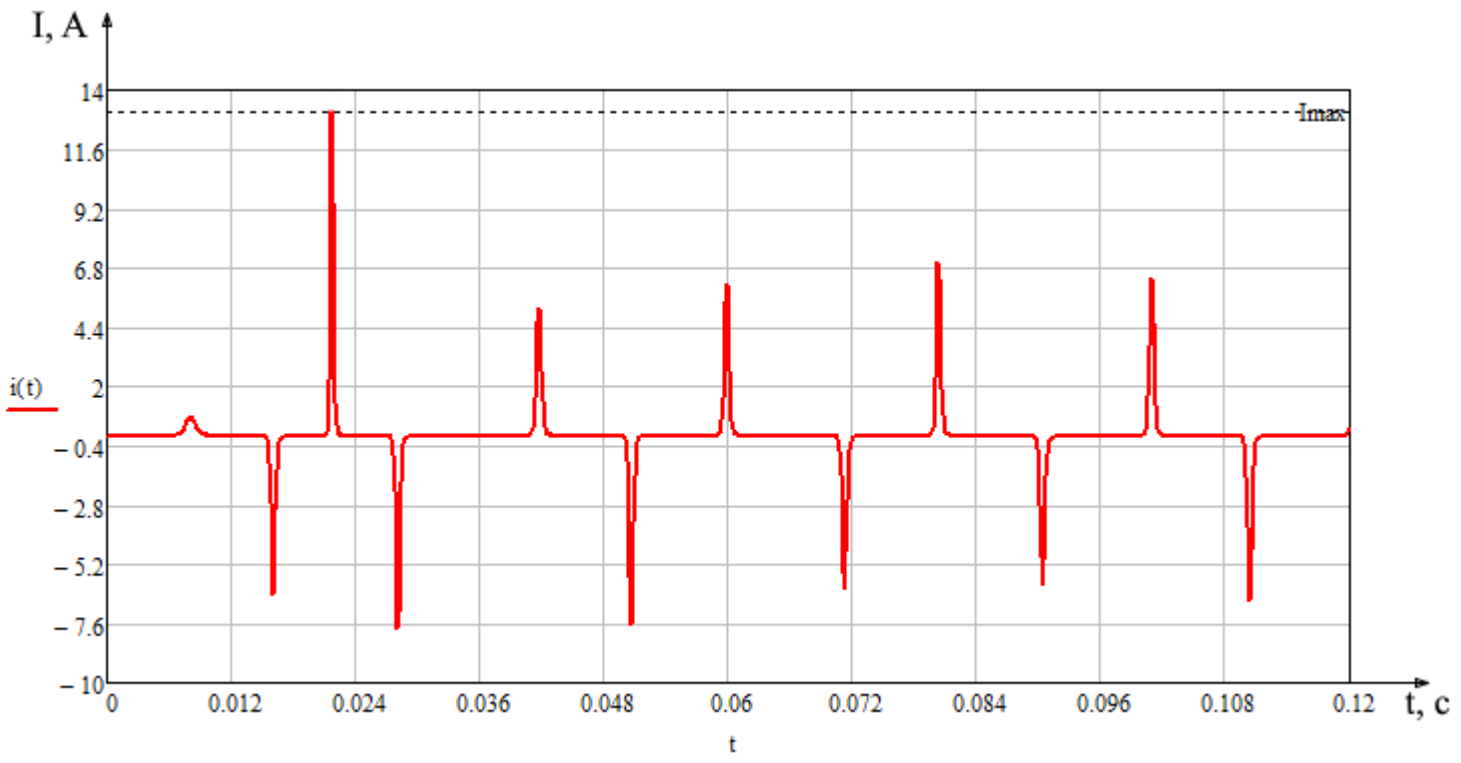


Рисунок 2.2.12 – Ток высоковольтной обмотки ТН при феррорезонансе

$I_{max} = 13,168$ А – максимальное значение тока ТН во время отключения ошиновки ОРУ.

Номинальный ток ТН составляет $I_n \approx 3$ мА.

Аналогичный расчёт проведём для следующей схемы 330-17 (Рисунок 2.2.13). В данной схеме феррорезонансный контур возникает при отключении трансформатором TV5 1-ой секции шин. Параметры схемы замещения те же самые, что и для схемы 330-16. Для данной схемы C_3 будет равно:

$$C_3 = C_{Ш} + 4C_P + C_{ТН},$$

где $C_{Ш}$ – ёмкость ошиновки относительно земли, пФ;

C_P – ёмкость разъединителей относительно земли, пФ;

$C_{ТН}$ – ёмкость трансформатора напряжения относительно земли, пФ.

$$C_3 = 500 + 4 \cdot 180 + 400 = 1620 \text{ пФ.}$$

Полученные значения ёмкостей сведём в таблицу 2.2.4.

Таблица 2.2.4 – Расчётные значения ёмкостей оборудования

Наименование схемы	C_B , пФ	C_3 , пФ	$C_Э$, пФ
330-17	4500	1620	0,735

Графические зависимости напряжений и тока показаны на рисунках 2.2.14, 2.2.15 и 2.2.16.

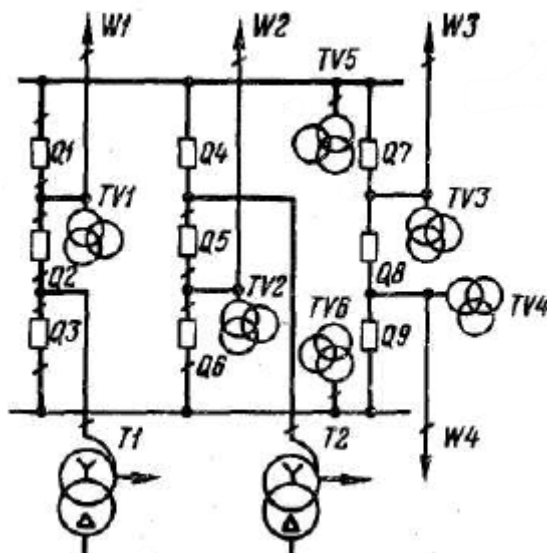


Рисунок 2.2.13 – Принципиальная схема «Полуторная схема» (330-17), где возможен феррорезонанс

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подп.	
Дата	

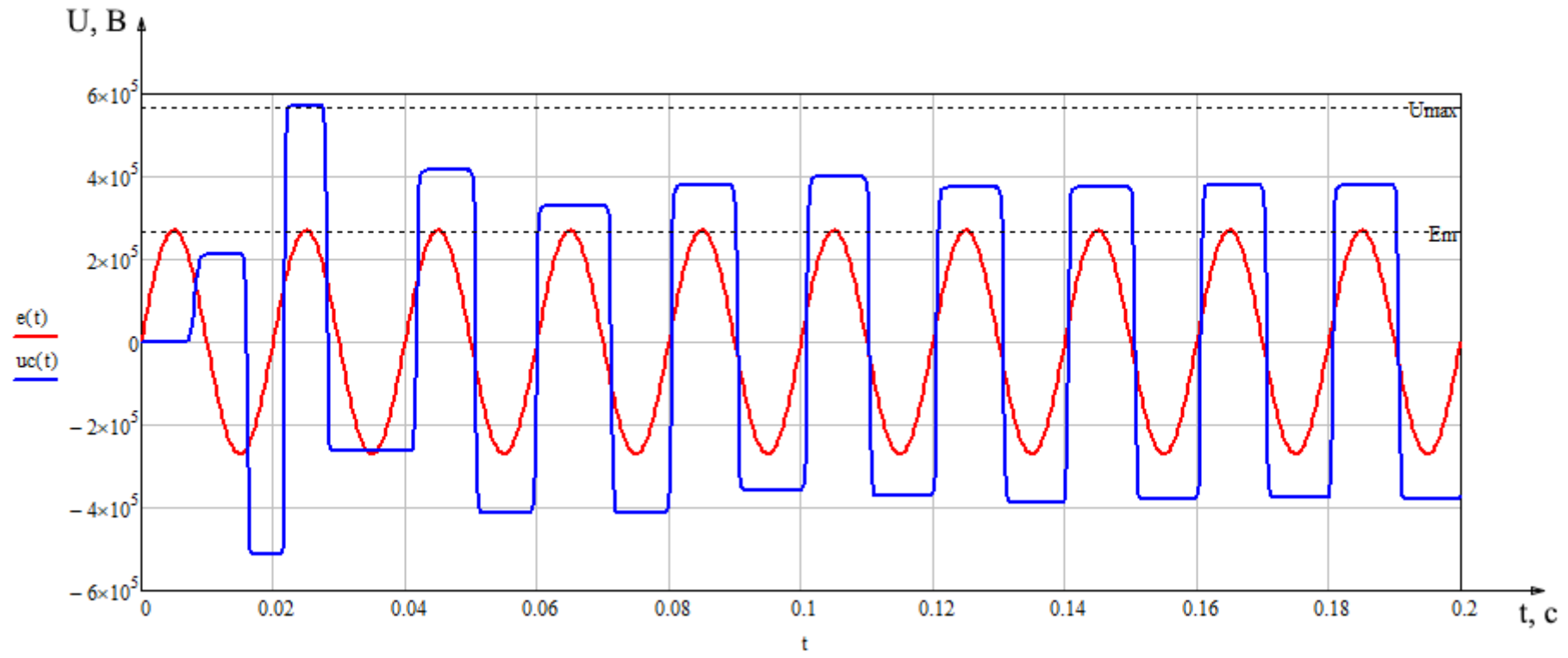


Рисунок 2.2.14 – Напряжение на ёмкостях выключателя при феррорезонансе

$U_{max} = 570,4$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 269,4$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

$$\text{Коэффициент перенапряжения } K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{570,4}{269,4} = 2,117.$$

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

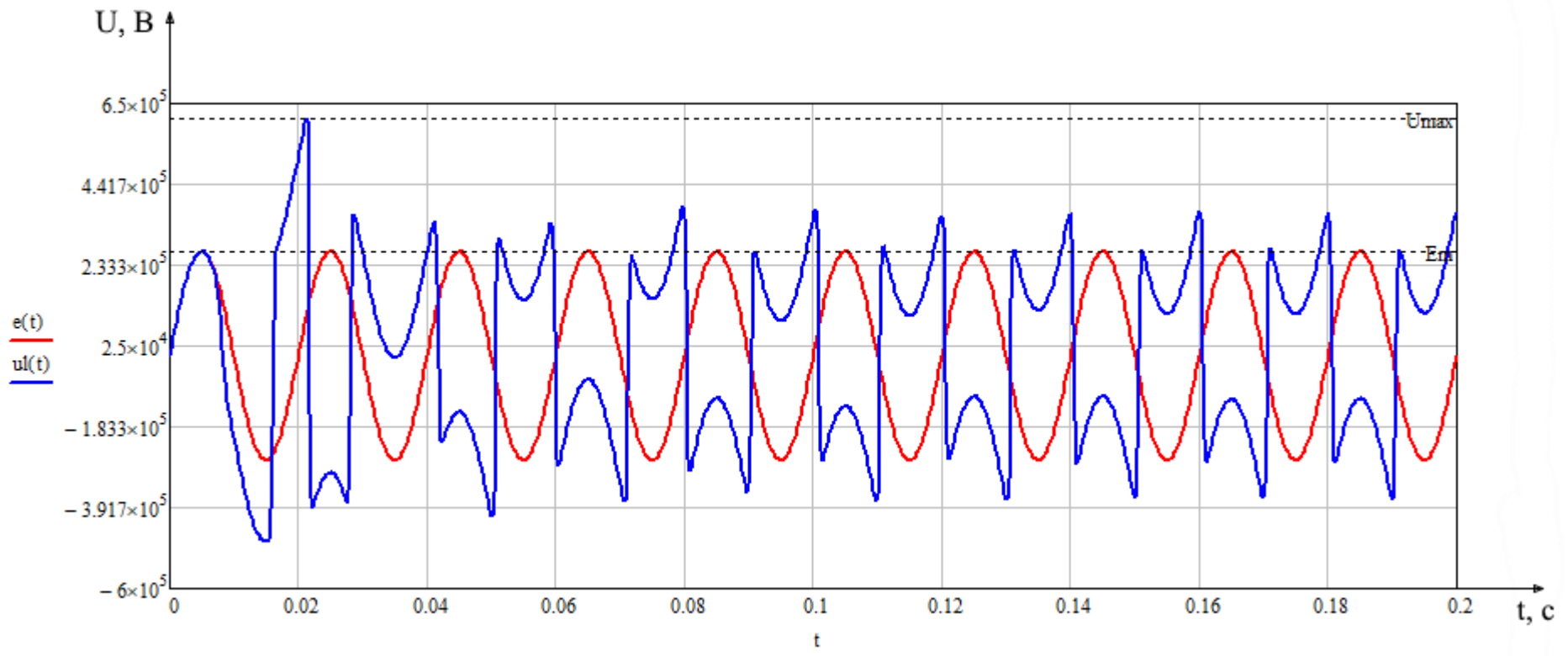


Рисунок 2.2.15 – Напряжение на ТН при феррорезонансе

$U_{max} = 613,9$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 269,4$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

Коэффициент перенапряжения $K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{613,9}{269,4} = 2,278.$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подп.	
Дата	

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

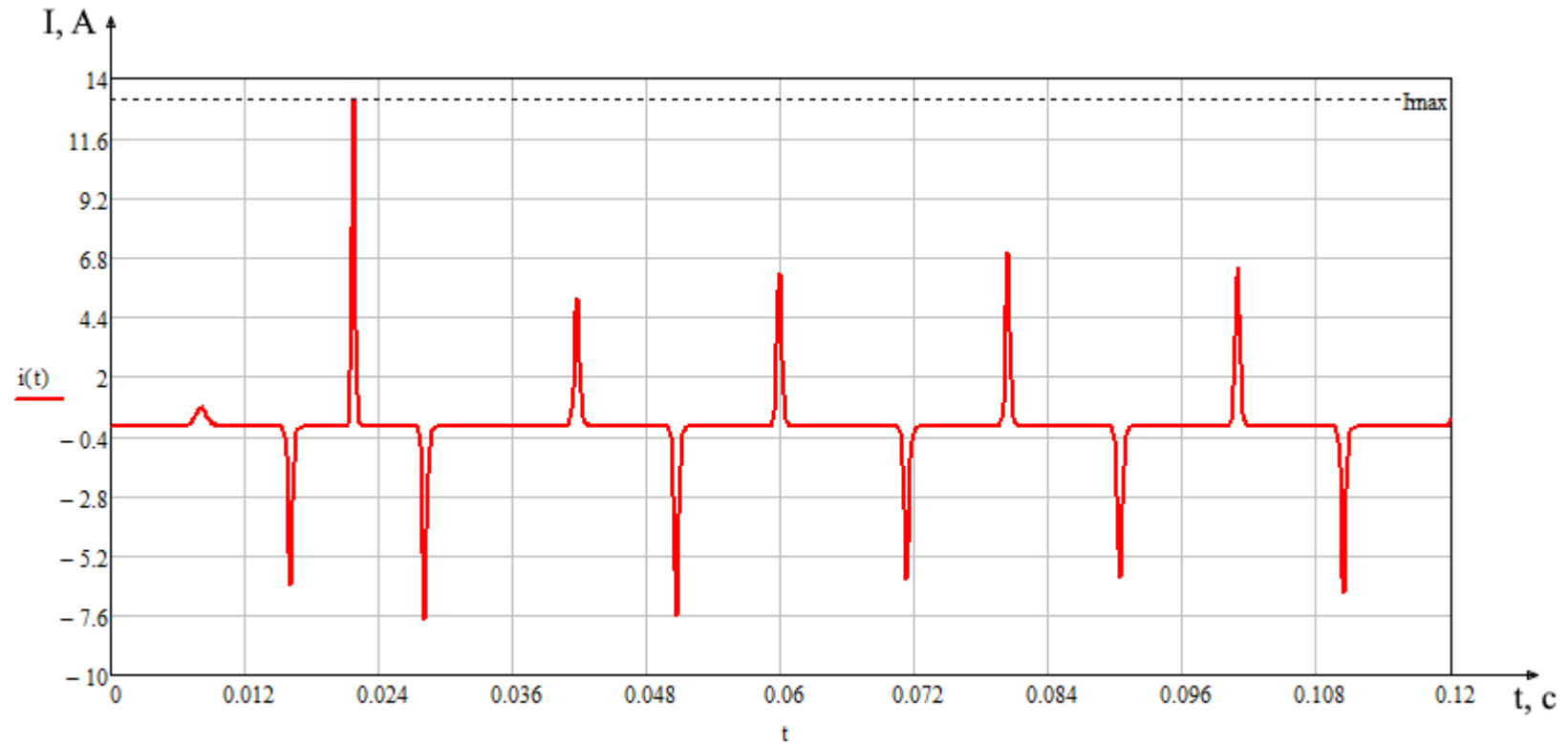


Рисунок 2.2.16 – Ток высоковольтной обмотки ТН при феррорезонансе

$I_{max} = 13,168$ А – максимальное значение тока ТН во время отключения ошиновки ОРУ.

Номинальный ток ТН составляет $I_n \approx 3$ мА.

Выводы по полученным графическим зависимостям для РУ 330 кВ.

1. Во всех рассмотренных схемах наблюдается явный феррорезонанс. Для наглядности сведём коэффициенты перенапряжений и максимальные токи ТН всех схем в таблицу 2.2.5.

Таблица 2.2.5 – Сравнение полученных коэффициентов с номинальными параметрами

Схема	330-7	330-15	330-16	330-17
Uстаж, кВ	617,6	539,6	570,4	570,4
K_{Uc}	2,292	2,003	2,117	2,117
Uлmax, кВ	587,4	603	613,9	613,9
$K_{Uл}$	2,18	2,238	2,278	2,278
Uнн, кВ	269,4	269,4	269,4	269,4
Imax, А	8,571	17,198	13,168	13,168
Iн, А	0,003	0,003	0,003	0,003

Видно, что в схемах 330-15, 330-16 и 330-17 наиболее сильно происходит феррорезонанс. Об этом можно судить по повышению напряжения на ТН относительно амплитудного значения номинального напряжения и многократного увеличения тока через ТН. Самой неблагоприятной схемой с точки зрения увеличения тока обмотки ТН является схема 330-15. Здесь ток превысил номинал аж в 5733 раза! Обмотка ВН ТН, не рассчитанная на такой ток, тут же сгорит и ТН выйдет из строя.

2. Ещё один признак присутствия феррорезонанса в схеме – пикообразная форма тока. Такая форма тока связана с насыщением стали магнитопровода ТН и наличием нечётных гармоник по амплитуде близких к основной гармонике.

3. Также легко замечается тенденция: чем больше в схеме отключается выключателей от системы шин и чем меньше ёмкость ошиновки + оборудования, тем больше становится ток через ТН и тем больше перенапряжения в схеме. Поэтому схема 330-15 имеет самый большой ток ТН при феррорезонансе, потому как при коммутации секции шин в этой схеме отключаются 4 выключателя.

2.3 Расчёт схемы замещения для типовых РУ 500 кВ

Согласно [4], типовыми схемами РУ 500 кВ являются:

- блок (линия-трансформатор) с выключателем (500-3Н);
- треугольник (500-6Н);
- четырёхугольник (500-7);
- трансформаторы-шины с присоединением линий через два выключателя (500-15);

- трансформаторы-шины с полуторным присоединением (500-16);
- полуторная схема (500-17).

Из этого списка, согласно [5], наиболее подвержены феррорезонансу следующие схемы: 500-7, 500-15, 500-16, 500-17.

По аналогии с РУ 3300 кВ первые две схемы (500-3Н и 500-6Н) не будут участвовать в расчёте.

Проверим условия возникновения феррорезонанса для остальных схем. Для примера рассчитаем схему 500-7 [5] (Рисунок 2.3.1).

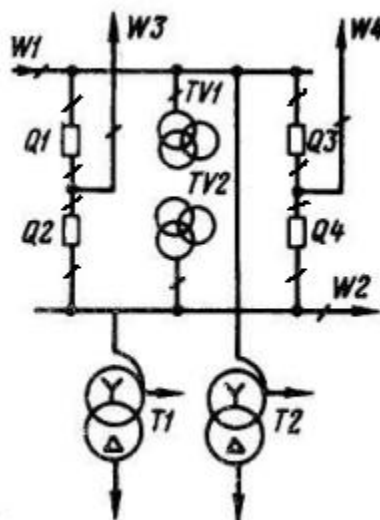


Рисунок 2.3.1 – Принципиальная схема «четырёхугольник» (500-7), где возможен феррорезонанс

В данной схеме феррорезонансный контур возникает при отключении трансформатором TV1 1-ой секции шин (W1).

Необходимо найти закон изменения напряжения на полюсах выключателя $u_C(t)$, напряжения на трансформаторе $u_l(t)$ и тока $i(t)$ в схеме и сравним с номинальными. Параметры схемы замещения необходимые для расчёта: сопротивление высшей обмотки напряжения ТН принимаем $R = 6675 \text{ Ом}$; вебер-амперная характеристика сердечника ТН $i(\psi) = a \cdot \sinh(b \cdot \psi)$. Ёмкости оборудования берём из расчёта на фазу. Ёмкость контактов одного выключателя $C_B = 1500 \text{ пФ}$ (для элегазовых выключателей) [6, п.5.6.5]. Ёмкость отключаемого оборудования РУ относительно земли C_3 возьмём из [6, таблица 5.2]. Для расчёта ёмкости ошиновки $C_{Ш}$ примем длину ошиновки 50 м. Эквивалентную ёмкость C_3 рассчитаем по формуле (2.2). Ёмкость C_3 для схемы 500-7 будет равна:

$$C_3 = C_{Ш} + 3C_P + C_{ТН},$$

где $C_{Ш}$ – ёмкость ошиновки относительно земли, пФ;

C_P – ёмкость разъединителей относительно земли, пФ;

$C_{ТН}$ – ёмкость трансформатора напряжения относительно земли, пФ.

$$C_3 = 550 + 3 \cdot 360 + 600 = 2230 \text{ пФ.}$$

Полученные значения ёмкостей сведём в таблицу 2.3.1.

Таблица 2.3.1 –Расчётные значения ёмкостей оборудования

Наименование схемы	C_B , пФ	C_3 , пФ	$C_Э$, пФ
500-7	3000	2230	0,574

Расчёт схемы и построение графических зависимостей напряжений и тока вёлся в программе MathCad с помощью команды *rkfixed*. Полученные зависимости напряжений и тока показаны на рисунках 2.3.2, 2.3.3 и 2.3.4.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подл.	Дата

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

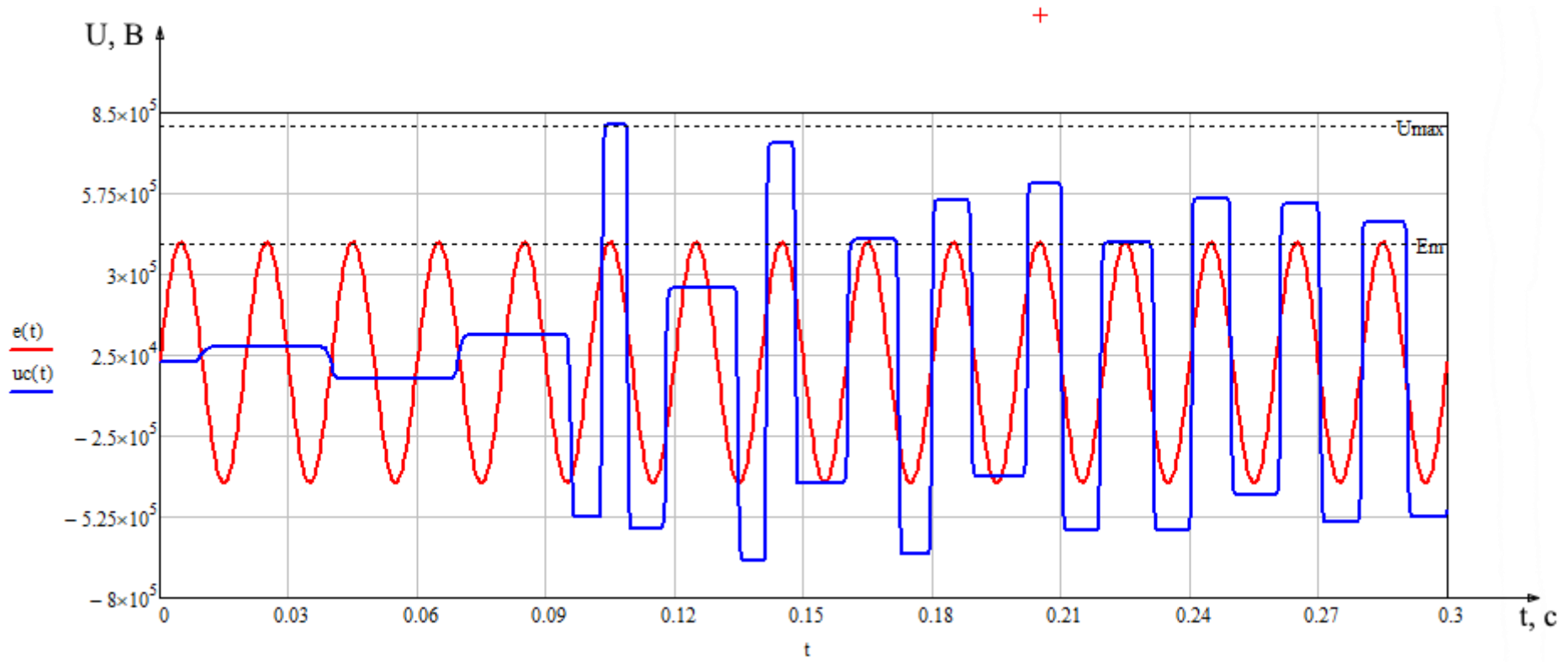


Рисунок 2.3.2 – Напряжение на ёмкостях выключателя при феррорезонансе

$U_{max} = 807,2$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 408,2$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

Коэффициент перенапряжения $K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{807,2}{408,2} = 1,977$.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

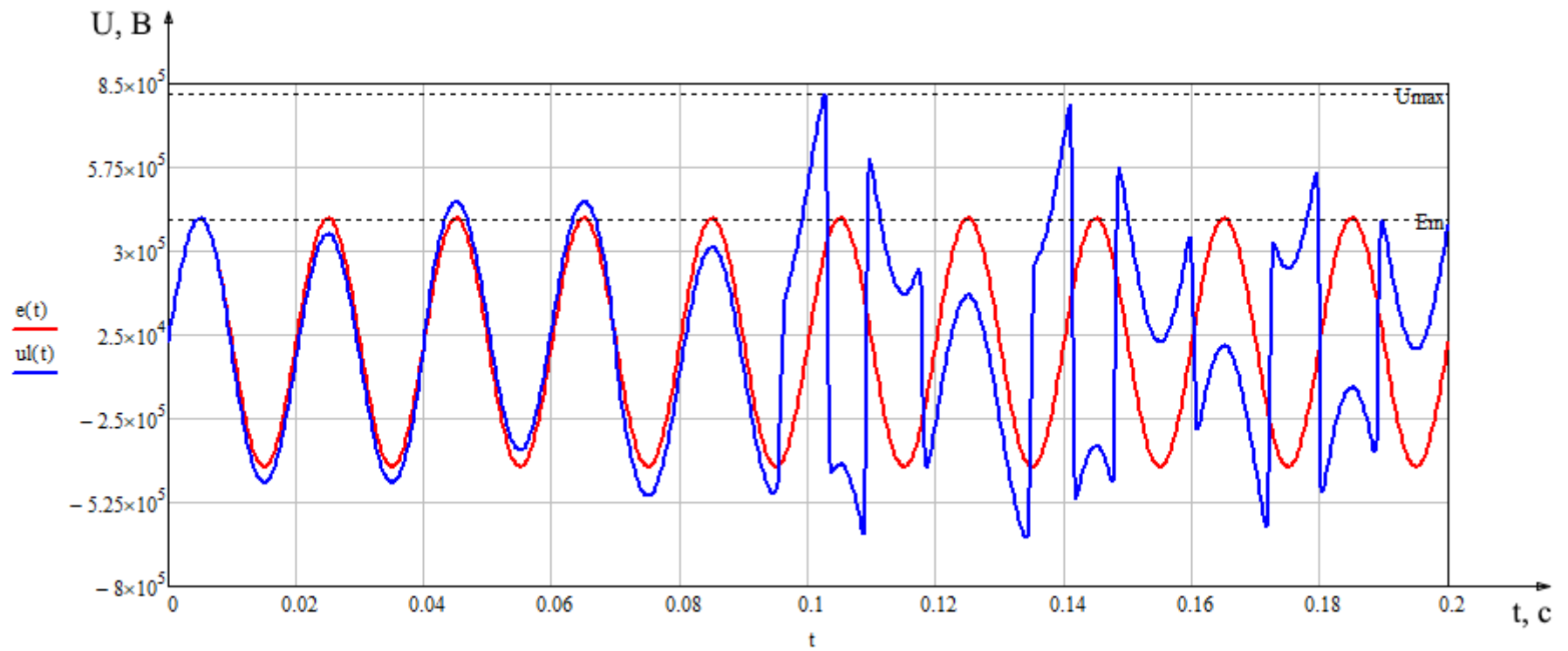


Рисунок 2.3.3 – Напряжение на ТН при феррорезонансе

$U_{max} = 818,2$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 408,2$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

$$\text{Коэффициент перенапряжения } K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{818,2}{408,2} = 2,004.$$

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подл.	
Дата	

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

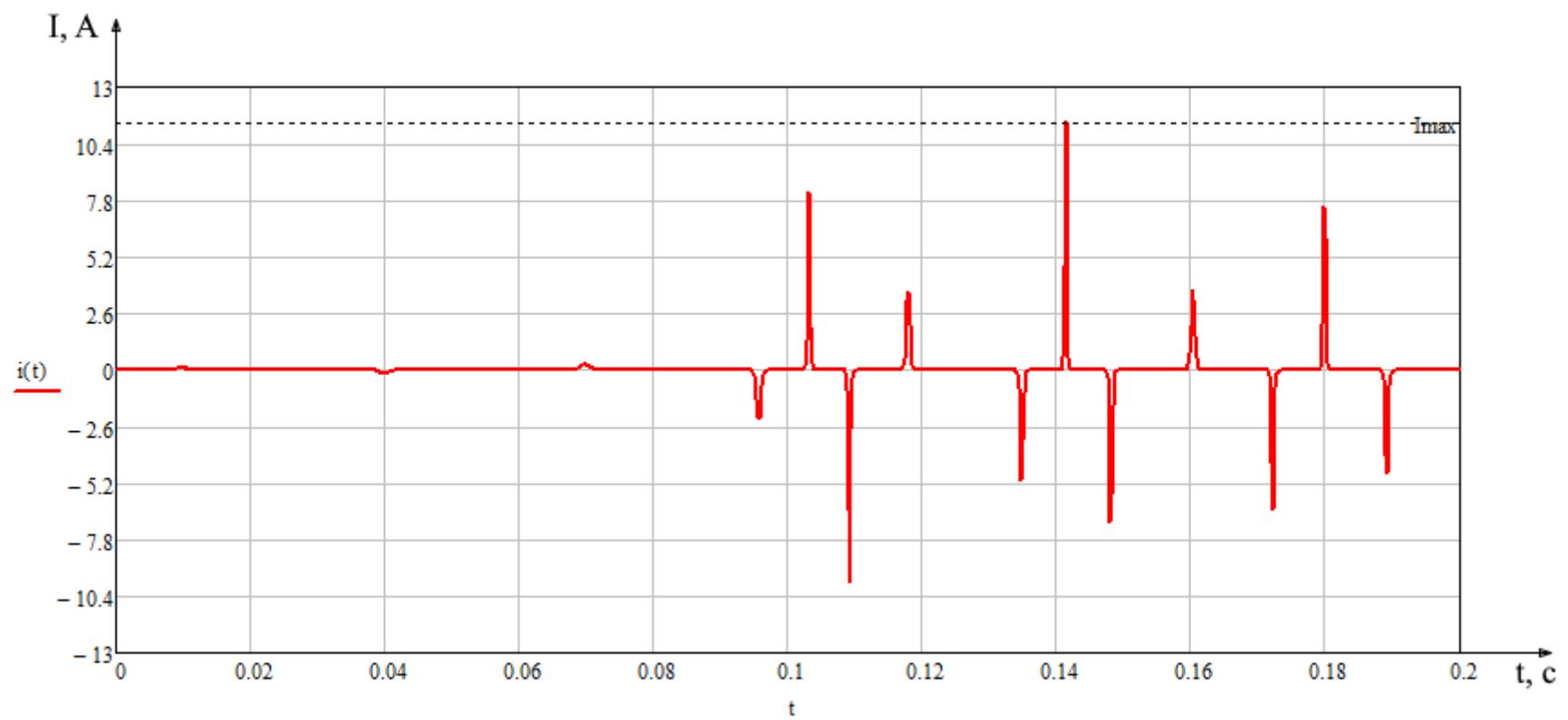


Рисунок 2.3.4 – Ток высоковольтной обмотки ТН при феррорезонансе

$i_{max} = 11,411$ А – максимальное значение тока ТН во время отключения ошиновки ОРУ.

Номинальный ток ТН составляет $I_n \approx 5$ мА.

Аналогичный расчёт проведём для следующей схемы 500-15 (Рисунок 2.3.5). В данной схеме феррорезонансный контур возникает при отключении трансформатором TV5 1-ой секции шин. Параметры схемы замещения те же самые, что и для схемы 500-7, за исключением ёмкости C_3 . Для данной схемы C_3 будет равно:

$$C_3 = C_{Ш} + 5C_P + C_{ТН},$$

где $C_{Ш}$ – ёмкость ошиновки относительно земли, пФ;

C_P – ёмкость разъединителей относительно земли, пФ;

$C_{ТН}$ – ёмкость трансформатора напряжения относительно земли, пФ.

$$C_3 = 550 + 5 \cdot 360 + 600 = 2950 \text{ пФ}.$$

Полученные значения ёмкостей сведём в таблицу 2.2.2.

Таблица 2.3.2 – Расчётные значения ёмкостей оборудования

Наименование схемы	C_B , пФ	C_3 , пФ	$C_Э$, пФ
500-15	6000	2950	0,67

Графические зависимости напряжений и тока показаны на рисунках 2.3.6, 2.3.7 и 2.3.8.

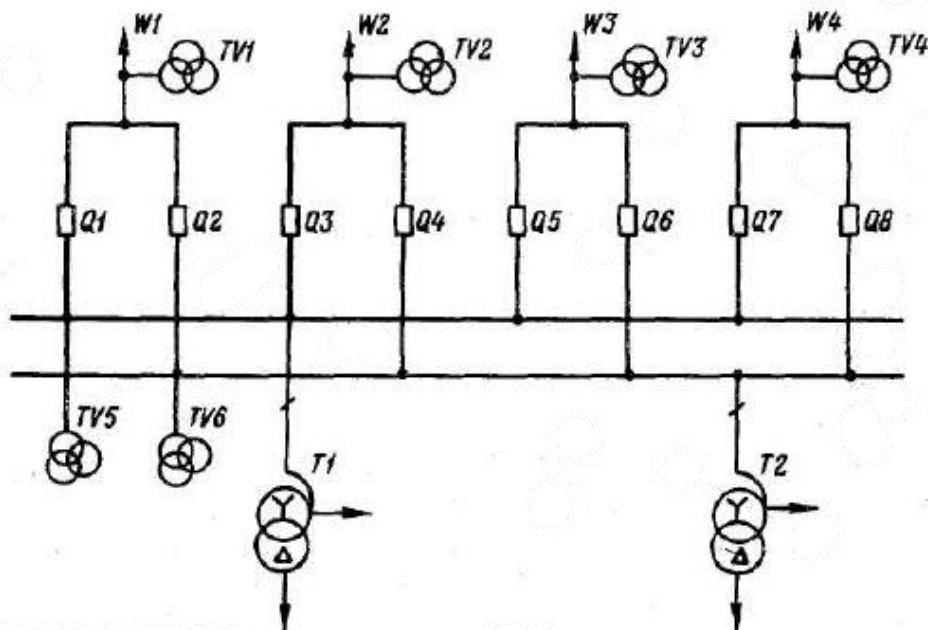


Рисунок 2.3.5 – Принципиальная схема «Трансформаторы-шины с присоединением линий через два выключателя» (500-15), где возможен феррорезонанс

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подп.	
Дата	

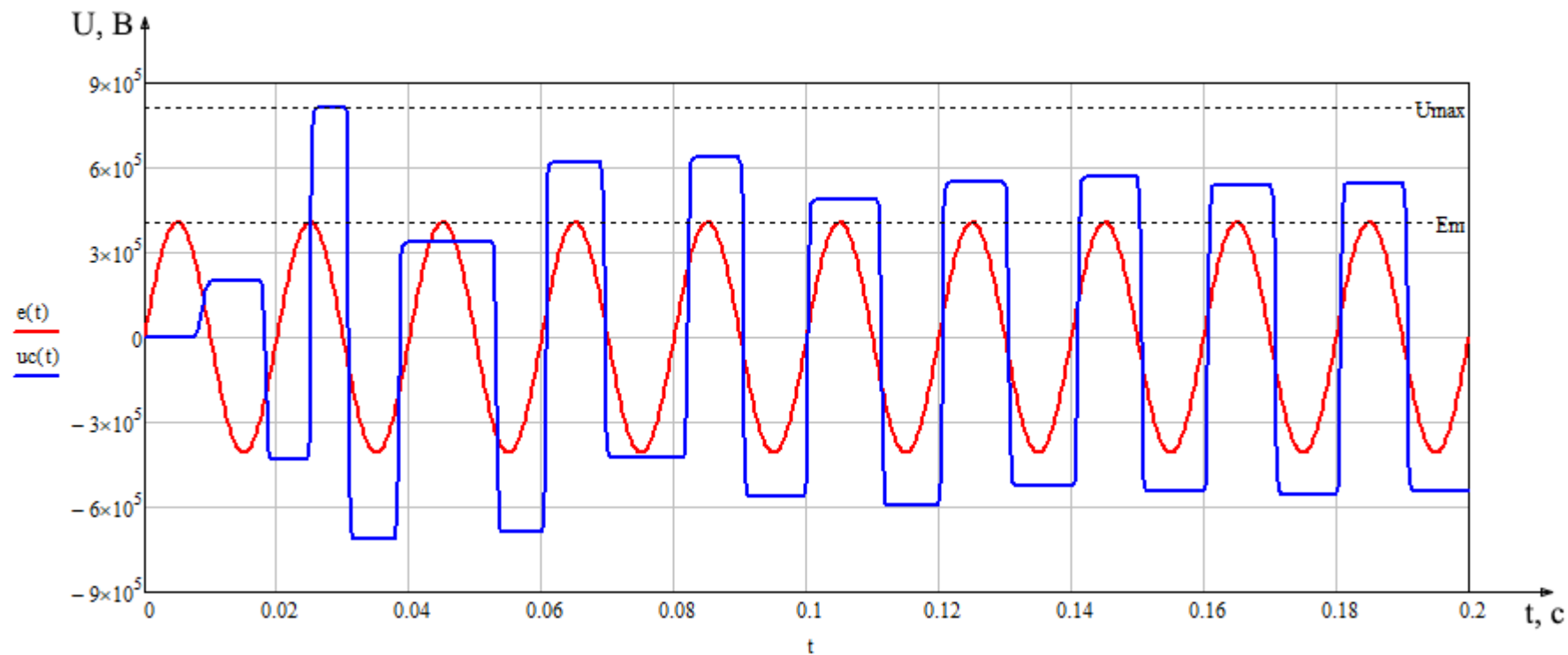


Рисунок 2.3.6 – Напряжение на ёмкостях выключателя при феррорезонансе

$U_{\max} = 814,9$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 408,2$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

$$\text{Коэффициент перенапряжения } K = \frac{U_{\max}}{E_m} = \frac{814,9}{408,2} = 1,996.$$

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подп.	
Дата	

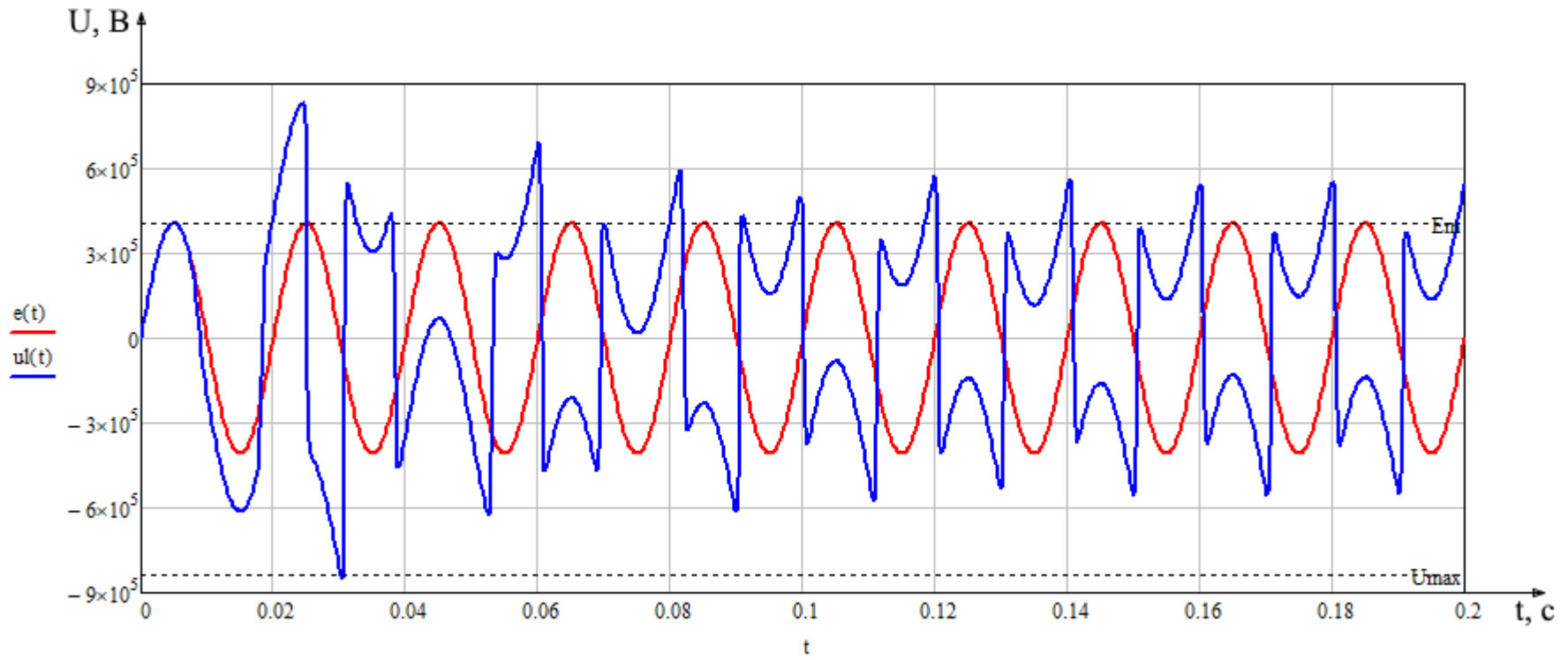


Рисунок 2.3.7 – Напряжение на ТН при феррорезонансе

$U_{max} = 834 \text{ кВ}$ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 408,2 \text{ кВ}$ – амплитудное значение ЭДС сети.

Коэффициент перенапряжения $K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{834}{408,2} = 2,043.$

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подп.	
Дата	

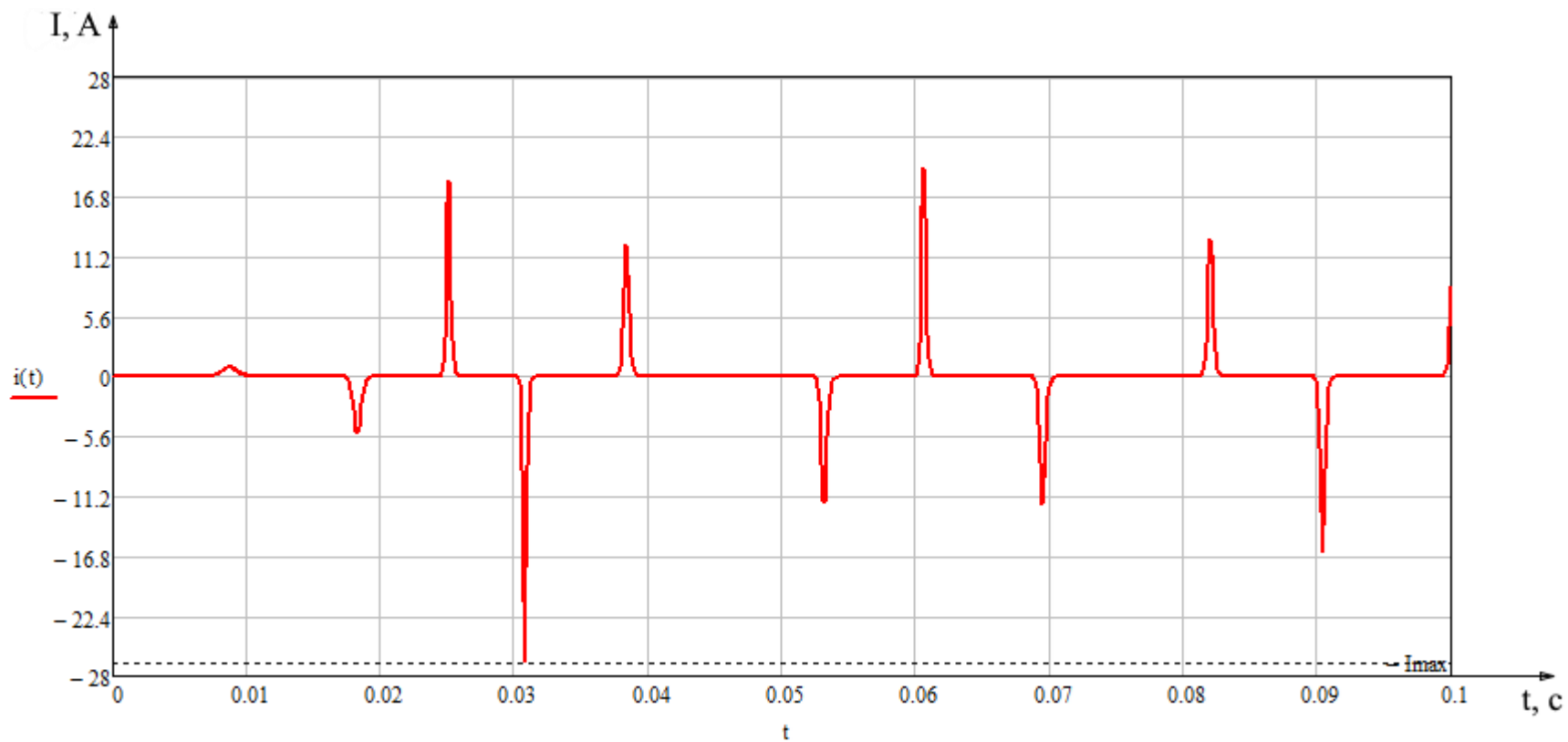


Рисунок 2.3.8 – Ток высоковольтной обмотки ТН при феррорезонансе

$I_{max} = 26,641$ А – максимальное значение тока ТН во время отключения ошиновки ОРУ.

Номинальный ток ТН составляет $I_n \approx 5$ мА.

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

Аналогичный расчёт проведём для следующей схемы 500-16 (Рисунок 2.3.9). В данной схеме феррорезонансный контур возникает при отключении трансформатором TV2 1-ой секции шин. Параметры схемы замещения те же самые, что и для схемы 500-7, за исключением ёмкости C_3 . Для данной схемы C_3 будет равно:

$$C_3 = C_{Ш} + 4C_P + C_{ТН},$$

где $C_{Ш}$ – ёмкость ошиновки относительно земли, пФ;

C_P – ёмкость разъединителей относительно земли, пФ;

$C_{ТН}$ – ёмкость трансформатора напряжения относительно земли, пФ.

$$C_3 = 550 + 4 \cdot 360 + 600 = 2590 \text{ пФ.}$$

Полученные значения ёмкостей сведём в таблицу 2.2.3.

Таблица 2.3.3 – Расчётные значения ёмкостей оборудования

Наименование схемы	C_B , пФ	C_3 , пФ	$C_Э$, пФ
500-16	4500	2590	0,635

Графические зависимости напряжений и тока показаны на рисунках 2.3.10, 2.3.11 и 2.3.12.

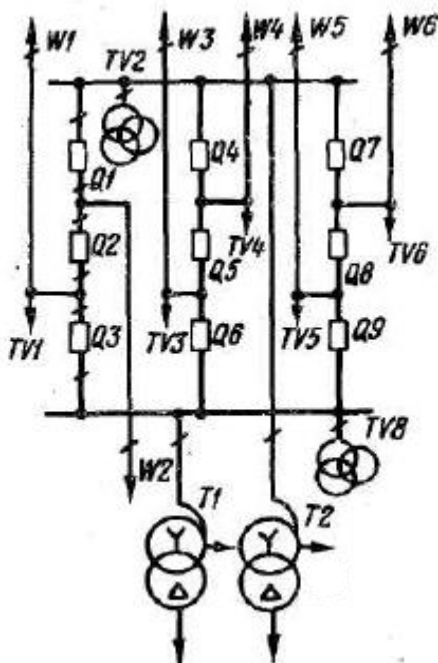


Рисунок 2.3.9 – Принципиальная схема «Трансформаторы-шины с полуторным присоединением линий» (500-16), где возможен феррорезонанс

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

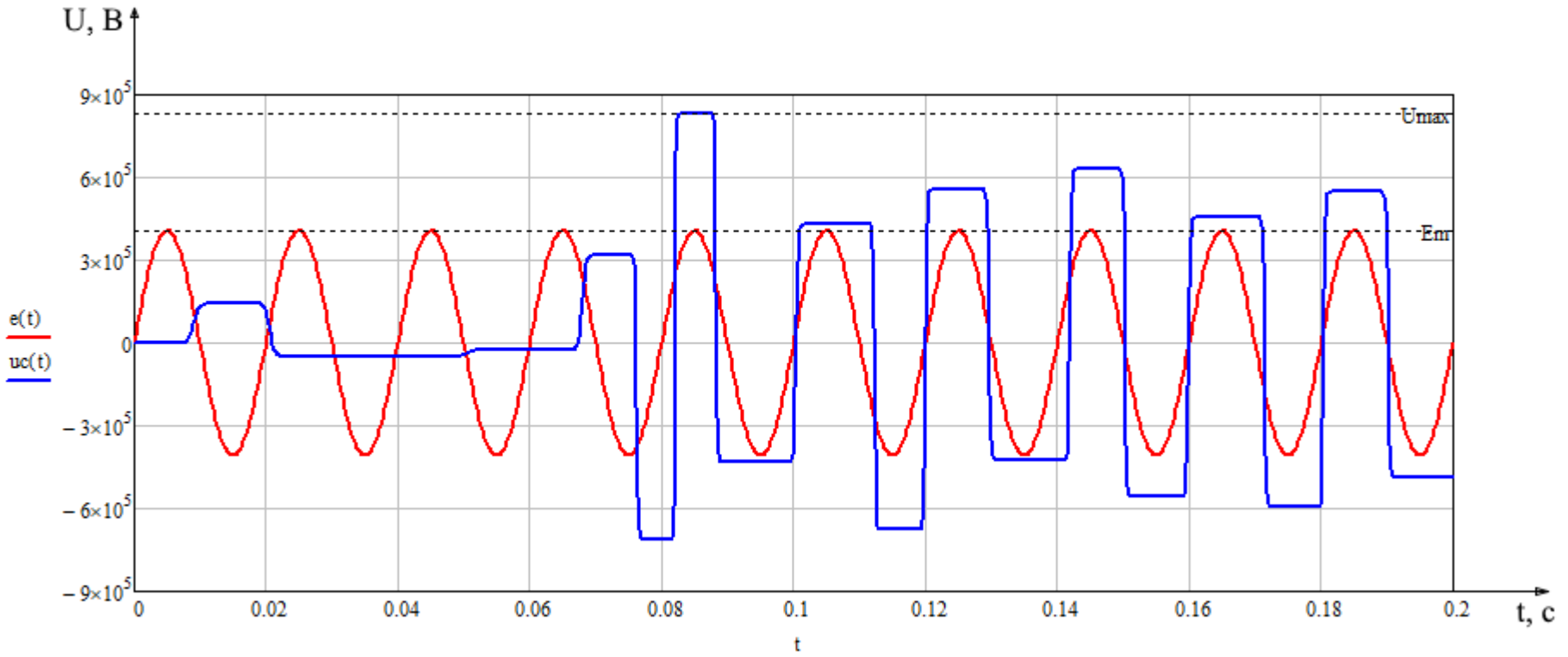


Рисунок 2.3.10 – Напряжение на ёмкостях выключателя при феррорезонансе

$U_{max} = 831,6$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 408,2$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

$$\text{Коэффициент перенапряжения } K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{831,6}{408,2} = 2,037.$$

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

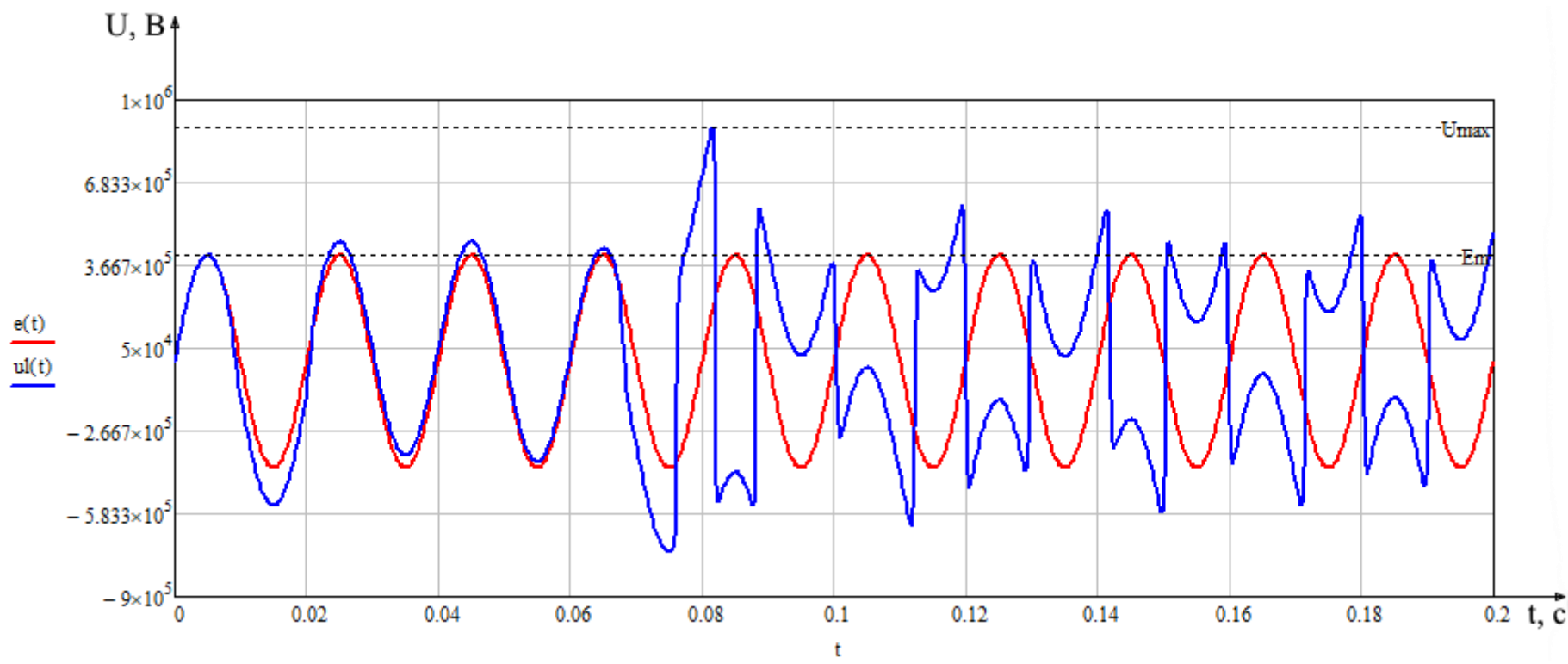


Рисунок 2.3.11 – Напряжение на ТН при феррорезонансе

$U_{max} = 897,1 \text{ кВ}$ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 408,2 \text{ кВ}$ – амплитудное значение ЭДС сети.

$$\text{Коэффициент перенапряжения } K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{897,1}{408,2} = 2,197.$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подп.	
Дата	

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

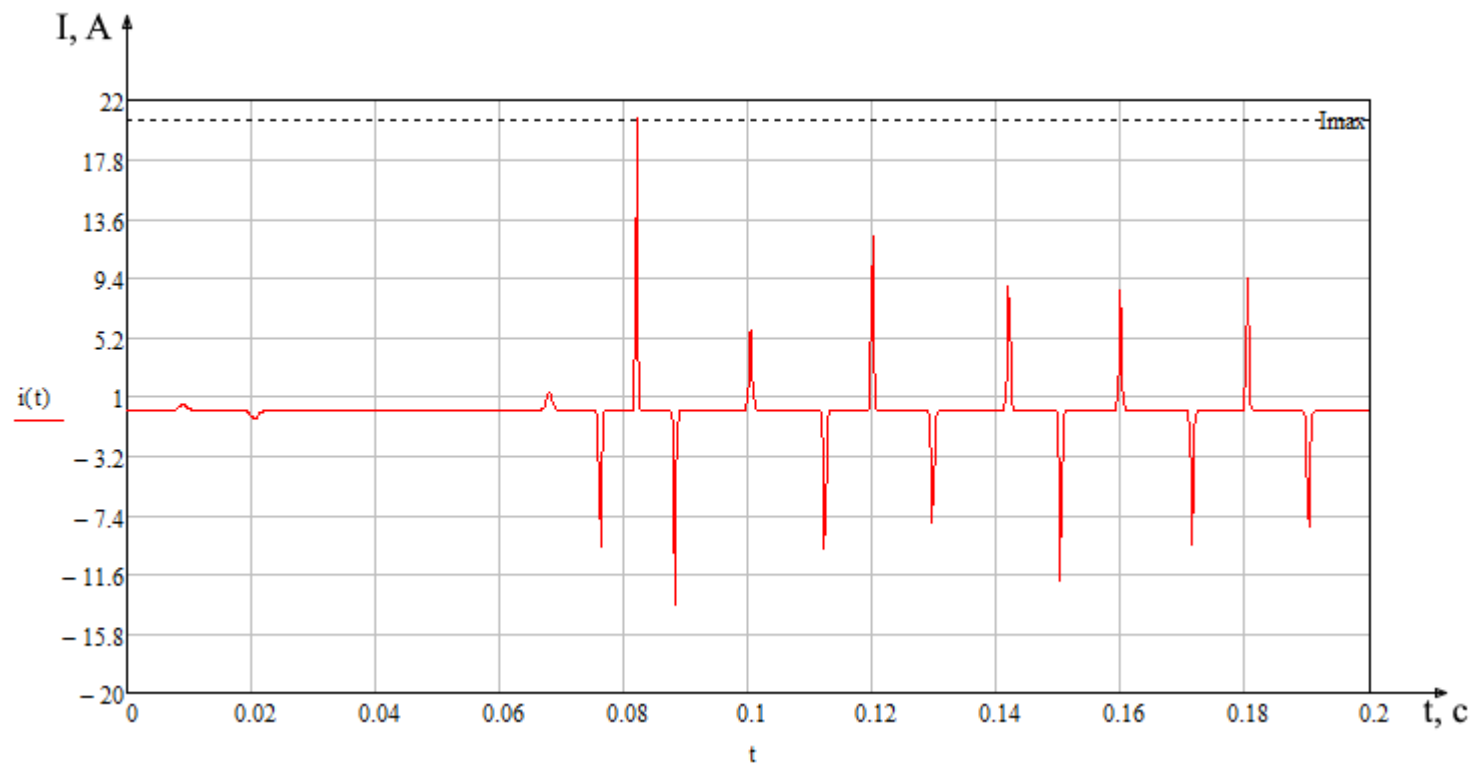


Рисунок 2.3.12 – Ток высоковольтной обмотки ТН при феррорезонансе

$i_{max} = 20,703$ А – максимальное значение тока ТН во время отключения ошиновки ОРУ.

Номинальный ток ТН составляет $I_n \approx 5$ мА.

Аналогичный расчёт проведём для следующей схемы 500-17 (Рисунок 2.2.13). В данной схеме феррорезонансный контур возникает при отключении трансформатором TV5 1-ой секции шин. Параметры схемы замещения те же самые, что и для схемы 330-16. Для данной схемы C_3 будет равно:

$$C_3 = C_{Ш} + 4C_P + C_{ТН},$$

где $C_{Ш}$ – ёмкость ошиновки относительно земли, пФ;

C_P – ёмкость разъединителей относительно земли, пФ;

$C_{ТН}$ – ёмкость трансформатора напряжения относительно земли, пФ.

$$C_3 = 500 + 4 \cdot 180 + 400 = 1620 \text{ пФ.}$$

Полученные значения ёмкостей сведём в таблицу 2.2.4.

Таблица 2.2.4 – Расчётные значения ёмкостей оборудования

Наименование схемы	C_B , пФ	C_3 , пФ	$C_Э$, пФ
500-17	4500	1620	0,735

Графические зависимости напряжений и тока показаны на рисунках 2.2.14, 2.2.15 и 2.2.16.

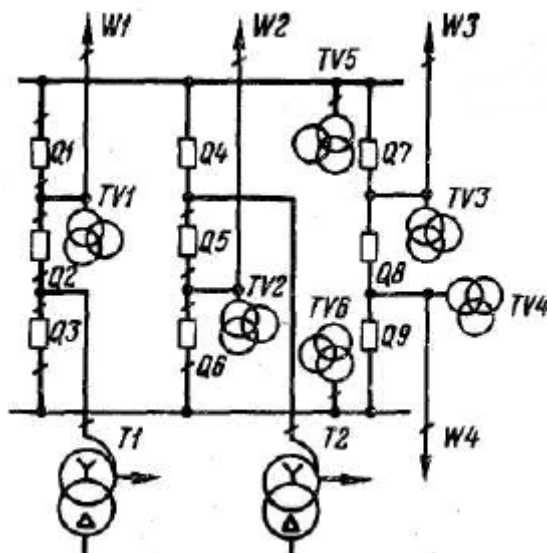


Рисунок 2.2.13 – Принципиальная схема «Полуторная схема» (500-17), где возможен феррорезонанс

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

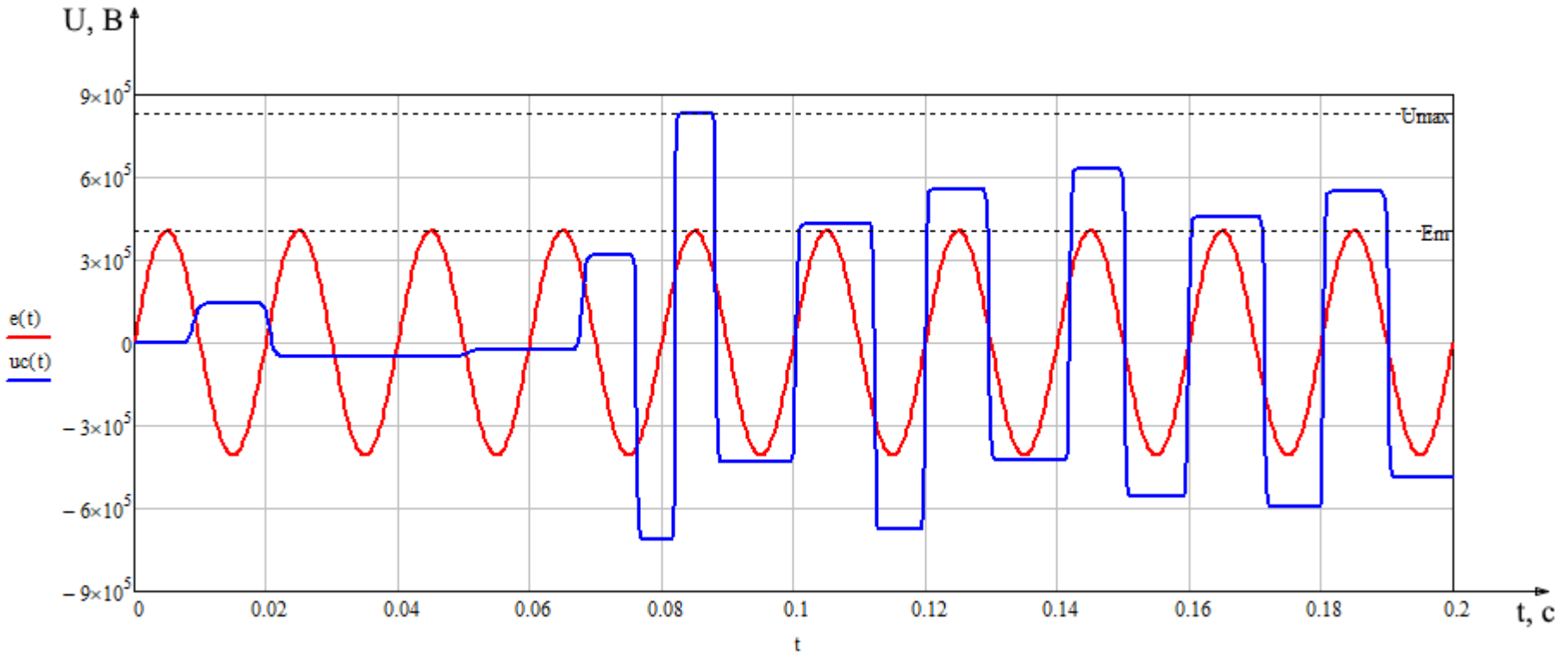


Рисунок 2.3.14 – Напряжение на ёмкостях выключателя при феррорезонансе

$U_{max} = 831,6$ кВ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 408,2$ кВ – амплитудное значение ЭДС сети.

$$\text{Коэффициент перенапряжения } K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{831,6}{408,2} = 2,037.$$

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подл.	
Дата	

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

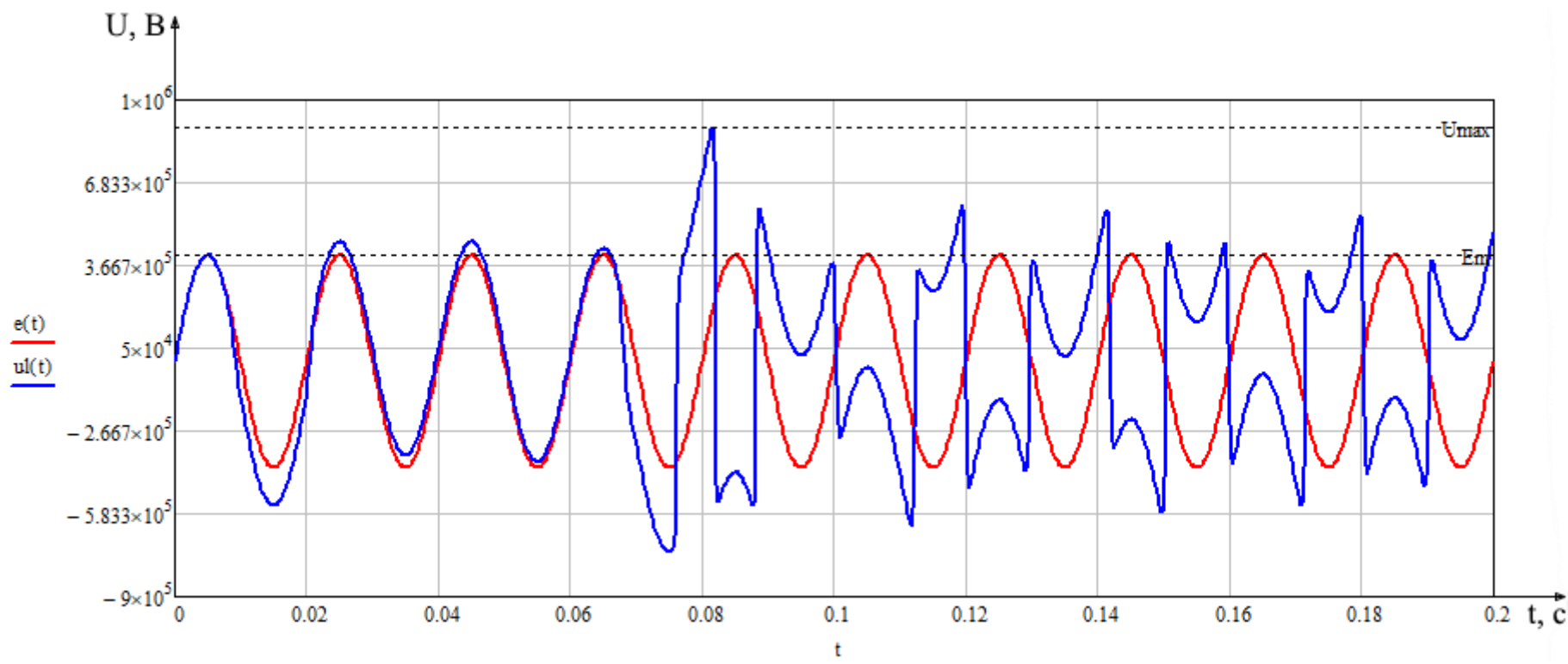


Рисунок 2.3.11 – Напряжение на ТН при феррорезонансе

$U_{max} = 897,1 \text{ кВ}$ – максимальное напряжение на разрывах выключателя во время отключения ошиновки ОРУ;
 $E_m = 408,2 \text{ кВ}$ – амплитудное значение ЭДС сети.

Коэффициент перенапряжения $K = \frac{U_{max}}{E_m} = \frac{897,1}{408,2} = 2,197.$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подл.	
Дата	

П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР

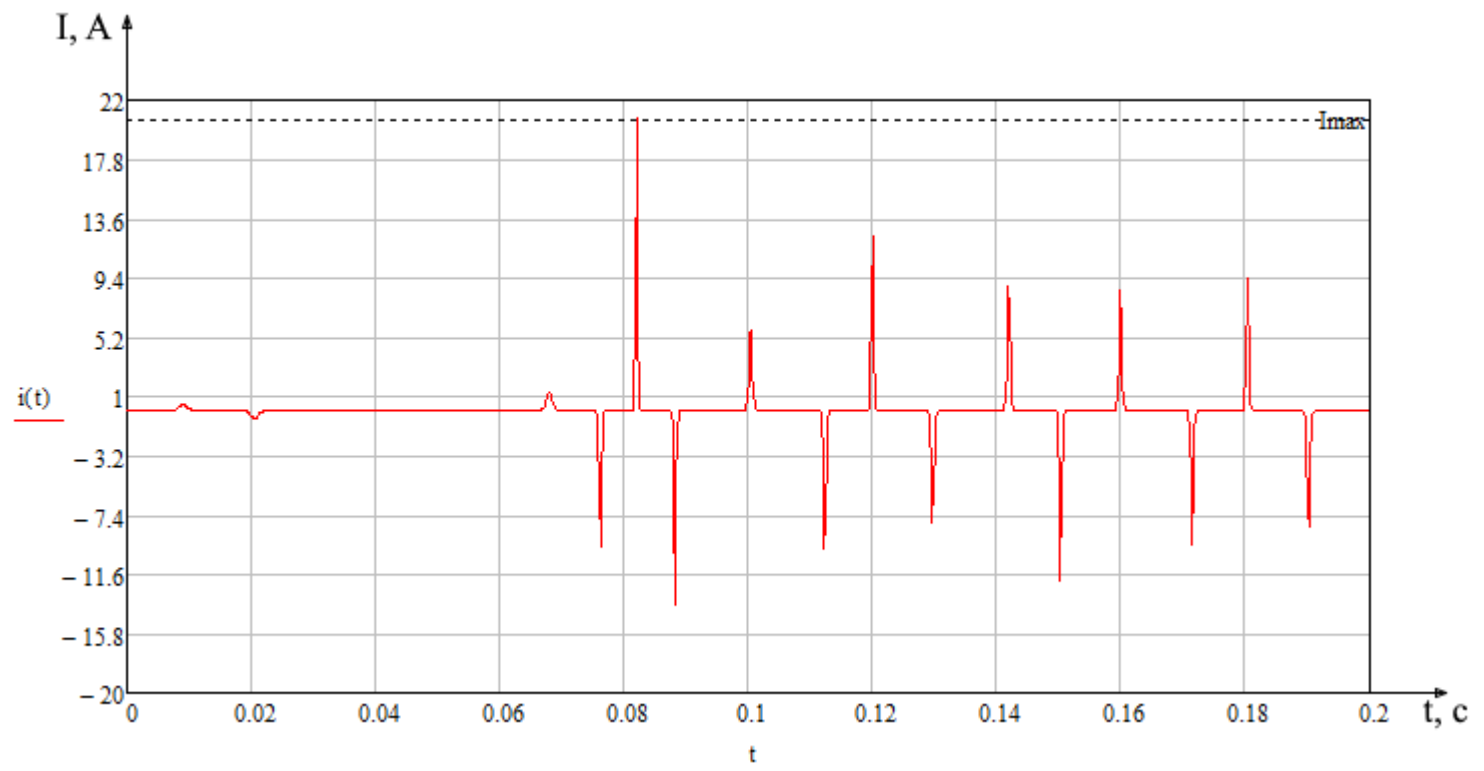


Рисунок 2.3.12 – Ток высоковольтной обмотки ТН при феррорезонансе

$I_{max} = 20,703 \text{ A}$ – максимальное значение тока ТН во время отключения ошиновки ОРУ.

Номинальный ток ТН составляет $I_n \approx 5 \text{ mA}$.

Выводы по полученным графическим зависимостям для РУ 500 кВ.

1. Во всех рассмотренных схемах наблюдается явный феррорезонанс. Для наглядности сведём коэффициенты перенапряжений и максимальные токи ТН всех схем в таблицу 2.2.5.

Таблица 2.2.5 – Сравнение полученных коэффициентов с номинальными параметрами

Схема	500-7	500-15	500-16	500-17
Uстах, кВ	807,2	814,9	831,6	831,6
K_{Uc}	1,977	1,996	2,037	2,037
Uлmax, кВ	818,2	834	897,1	897,1
$K_{Uл}$	2,004	2,043	2,197	2,197
Uнм, кВ	408,2	408,2	408,2	408,2
Iтах, А	11,411	26,641	20,703	20,703
Iн, А	0,005	0,005	0,005	0,005

Видно, что в схемах 500-15, 500-16 и 500-17, как и в аналогичных схемах РУ 330 кВ, наиболее сильно происходит феррорезонанс. Об этом можно судить по повышению напряжения на ТН относительно амплитудного значения номинального напряжения и многократного увеличения тока через ТН. Самой неблагоприятной схемой с точки зрения увеличения тока обмотки ТН является схема 330-15. Здесь ток превысил номинал в 5328 раза! Обмотка ВН ТН, не рассчитанная на такой ток, тут же сгорит и ТН выйдет из строя.

2. Ещё один признак присутствия феррорезонанса в схеме – пикообразная форма тока. Такая форма тока связана с насыщением стали магнитопровода ТН и наличием нечётных гармоник по амплитуде близких к основной гармонике.

3. Также легко замечается тенденция: чем больше в схеме отключается выключателей от системы шин и чем меньше ёмкость ошиновки + оборудования, тем больше становится ток через ТН и тем больше перенапряжения в схеме. Поэтому схема 330-15 имеет самый большой ток ТН при феррорезонансе, потому как при коммутации секции шин в этой схеме отключаются 4 выключателя.

Выводы по разделу 2.

В данном разделе была построена схема замещения для расчёта феррорезонанса в РУ 330-500. Были рассмотрены типовые компоновки РУ 330-500 и проведён расчёт переходных режимов в этих схемах. Выявлено, что при приведённых в разделе компоновках наблюдается явный феррорезонанс, и что данные схемы нельзя эксплуатировать.

3 ВЛИЯНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ (МУРЗ)

3.1 Влияние перенапряжений на МУРЗ. Способы защиты МУРЗ от перенапряжений

В наши дни на подстанциях всё чаще применяют микропроцессорные устройства релейной защиты (далее МУРЗ). Они обладают рядом преимуществ перед электромагнитными типами релейной защиты: высокая точность, высокая чувствительность и быстроедействие (малая инерционность). Но, несмотря на все преимущества, нельзя не заметить, пожалуй, главный недостаток таких устройств – плохо реагируют на перенапряжения и электромагнитные помехи в сети. Требования к МУРЗ по обеспечению электромагнитной совместимости (далее ЭМС) куда выше, чем у их электромагнитных собратьев.

Из-за высокой чувствительности к электромагнитным помехам МУРЗ стойкость микросхем к перенапряжениям на несколько порядков ниже, чем стойкость электромагнитных реле. Импульсные перенапряжения, возникающие при коммутациях в силовых электроустановках, способны повреждать и разрушать как электронные устройства, так и целые системы. Многолетняя статистика подтверждает, что число таких повреждений удваивается каждые три-четыре года [9]. Эта статистика хорошо согласовывается с законом Мура [10], еще в 1965 году показавшем, что количество полупроводниковых компонентов в микрочипах удваивается примерно каждые два года. И такая тенденция сохраняется уже много лет.

Пути проникновения помех в МУРЗ при коммутационных перенапряжениях могут быть разными: от прямых индуктированных наводок на низковольтные провода и кабели вторичных цепей подстанций до импульсных и высокочастотных перенапряжений, возникающих во вторичных обмотках трансформаторов тока и напряжения. Эффективной мерой борьбы с наведенными перенапряжениями на входах электронной аппаратуры и на ее зажимах питания является широкое использование элементов с нелинейной характеристикой: газовых разрядников, варисторов, специальных полупроводниковых элементов на основе стабилитронов и других устройств, включаемых параллельно защищаемому объекту (например, параллельно входу МУРЗ) и между каждой клеммой этого объекта и «землей». Наилучшими характеристиками обладают на данный момент резисторы с нелинейной характеристикой, выполненные из прессованного порошка оксида цинка ZnO (реже — из карбида кремния, титаната бария и других материалов), — варисторы, которые и получили наибольшее распространение. Выпускаются они сегодня в огромных количествах: без корпусов, в корпусах различных типов, часто снабжаются всякими вспомогательными элементами (предохранителями, сигнальными флажками и т. п.). Варисторы должны быть правильно выбраны. К сожалению, часто приходится наблюдать ситуацию, при которой варисторы даже в аппаратуре ведущих мировых производителей выбраны неверно и, фактически, никакими защитными функциями не обладают.

					П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

3.2 Влияние на МУРЗ гармоник в измеряемом токе и напряжении.

Гармоники на высокой стороне ТН при переходном процессе, да и в нормальном режиме работы сети слабо влияют на работу МУРЗ, так как практически все типы МУРЗ снабжены импульсными источниками питания, на входе которых стоит выпрямитель с фильтром. Выпрямленное и отфильтрованное напряжение преобразуется в высокочастотное, изменяется по величине, стабилизируется, а затем снова выпрямляется и снова фильтруется. Все эти преобразования, осуществляемые в импульсных источниках питания, практически сводят к нулю влияние на МУРЗ гармоник в питающей сети.

3.3 Рекомендации для предотвращения феррорезонансных процессов в РУ 330-500.

Согласно [5] в сетях 330-500 кВ могут быть применены следующие способы предотвращения феррорезонанса:

- выбор схемы РУ, при которой достигается такое расположение электромагнитных трансформаторов напряжения, что не создаётся контура для протекания феррорезонансных процессов;
- применение ёмкостных трансформаторов напряжения типа НДЕ вместо электромагнитных типа НКФ;
- увеличение ёмкости ошиновки путём подключения батарей конденсаторов связи;
- снятие ёмкостных делителей напряжения с воздушных выключателей (должно быть согласовано с заводом-изготовителем).
- применение антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ;
- при выборе схемы РУ стараться уменьшать число присоединений к одной секции шин, т.к. уменьшается число выключателей, а, следовательно, становится меньше ёмкость, шунтирующая контакты выключателя, что не приводит к появлению феррорезонанса в схеме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной научной работе были рассмотрены различные компоновки схем РУ 330-500 на наличие условий возникновения феррорезонанса.

Для расчёта феррорезонансных процессов была произведена аппроксимация стали магнитопровода трансформатора напряжения НКФ методом гиперболического синуса. Был произведён расчёт феррорезонансных процессов в схемах РУ 330-500 в среде MathCad. После расчёта было выяснено, что наиболее неблагоприятной схемой, с точки зрения токовых перегрузок ТН, является схема 330-15 (500-15). В данной схеме ток через обмотку ВН трансформатора напряжения при феррорезонансе превышал номинальный ток ТН в 5000 раз.

Были даны рекомендации по предупреждению феррорезонанса в сетях высокого напряжения. Также было отмечено воздействие перенапряжений, вызванных феррорезонансом, на современные микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ). Благодаря высокой чувствительности и малой термической и электродинамической стойкости элементов МУРЗ, перенапряжения пагубно сказываются на нормальной работе данных устройств.

Можно сказать, что феррорезонансные перенапряжения являются нежелательным процессом для некоторых устройств и оборудования той или иной схемы. Но в настоящее время феррорезонансные явления в сетях высокого напряжения довольно хорошо изучены и разработано много методов и способов борьбы с ними.

					<i>П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						51
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. УДК 621.314.2:621.3.016.36:621.3.014. И.В. Пентегов, С.В. Рымар. Метод расчёта тока холостого хода трансформатора, ориентированный на использование в САПР.
2. Дымков А.М., Тишенин Ю. В., Кибель В.М. Трансформаторы напряжения. Издательство 2-е, переработанное и дополненное. М., «Энергия», 1975 г.
3. Дымков А.М. Расчёт и конструирование трансформаторов. Издательство «Высшая школа», 1975 г.
4. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кв. Типовые решения.
5. УДК 621.311.1(083.96). Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими ёмкостные делители напряжения. МУ 34-70-163-87.
6. СТО 56947007- 29.240.10.191-2014. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6-750 кВ.
7. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. г. Санкт-Петербург, 1999 г.
8. В. Гуревич. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Часть 1.– Компоненты и технологии №2, 2010 г.
9. Иванов П. Trabtech — технология для защиты электрооборудования от импульсных перенапряжений // Компоненты и технологии. 2003. № 6.
10. Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits // Electronics. Vol. 38. No. 8. 1965.
11. Применение MathCAD в решении задач электротехники. Часть 2. Переходные процессы. Нелинейные цепи. Теория электромагнитного поля. Учебно-методическое пособие для студентов электротехнических специальностей. – Минск, 2013 г.
12. Холоднокатаные электротехнические стали. Справочник под ред. Б.В. Молотилова. – Москва, «Металлургия», 1989 г.
13. УДК 621.311.052.333.015.3. Феррорезонансные явления в сетях с глухозаземлённой нейтралью и мероприятия по их предотвращению. К.т.н. Я.А. Цирель и инж. В.С. Поляков.
14. Дементьев Ю.А., Горюшин Ю.А., Дарьян Л.А., Архипов И.Л., Акоюн А.Г., Берлин Б.Е., Агафонов Г.Е., Кадомская К.П., Лаптев О.И., Гайворонский А.С. Экспериментальные и теоретические исследования условий возникновения феррорезонанса в сети 500 кВ с трансформаторами напряжения типов НКФ и НАМИ. – Электро 4, 2007г.
15. Поляков. В.С. Условия возникновения и существования феррорезонанса в цепях с электромагнитными измерительными трансформаторами напряжения.

					<i>П-282.13.04.02.232 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						52
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		