



facts-plus.com
инженерные решения и программное обеспечение



РЕКОМЕНДУЕМЫЕ УТОЧНЕНИЯ ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ В СЕТЯХ 6–35 кВ

И.И. Никулов¹, Д.А. Матвеев², А.В. Жуйков³, М.В. Фролов³

**¹ Раменский электротехнический завод «Энергия»,
Раменское, Россия**

² ООО «ФАКТС Плюс», Москва, Россия

**³ Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
Москва, Россия**

Функции дугогасящих реакторов

Дугогасящие реакторы (ДГР) решают следующие задачи:

- 1) компенсируют емкостную составляющую тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), что позволяет:
 - снизить вероятность устойчивого горения дуги при дуговом ОЗЗ;
 - удовлетворить требованиям по электробезопасности в режиме ОЗЗ;
- 2) уменьшают скорость восстановления напряжения поврежденной фазы после погасания дуги, что позволяет:
 - увеличить вероятность самовосстановления изоляции;
 - снизить частоту воздействия перенапряжений на изоляцию неповрежденных фаз, и как следствие – вероятность ее повреждения;
- 3) снижают кратность дуговых перенапряжений.

Коэффициент некомпенсированности

В сети с компенсацией действующее значение остаточного тока замыкания $I_{\text{ост}}$ может быть выражено следующим образом:

$$I_{\text{ост}} = \sqrt{I_a^2 + (I_C - I_L)^2 + I_{\text{в.г.}}^2},$$

где I_a – действующее значение активной составляющей основной гармоники тока ОЗЗ;

I_C – действующее значение емкостной составляющей основной гармоники тока ОЗЗ;

I_L – действующее значение индуктивной составляющей основной гармоники тока ДГР;

$I_{\text{в.г.}}$ – действующее значение высших гармонических составляющих остаточного тока замыкания.

Разделим обе части уравнения на I_C :

$$\frac{I_{\text{ост}}}{I_C} = \sqrt{\delta_a^2 + \vartheta^2 + \delta_{\text{в.г.}}^2},$$

где δ_a – коэффициент успокоения сети (отношение активной и емкостной составляющих основной гармоники тока ОЗЗ);

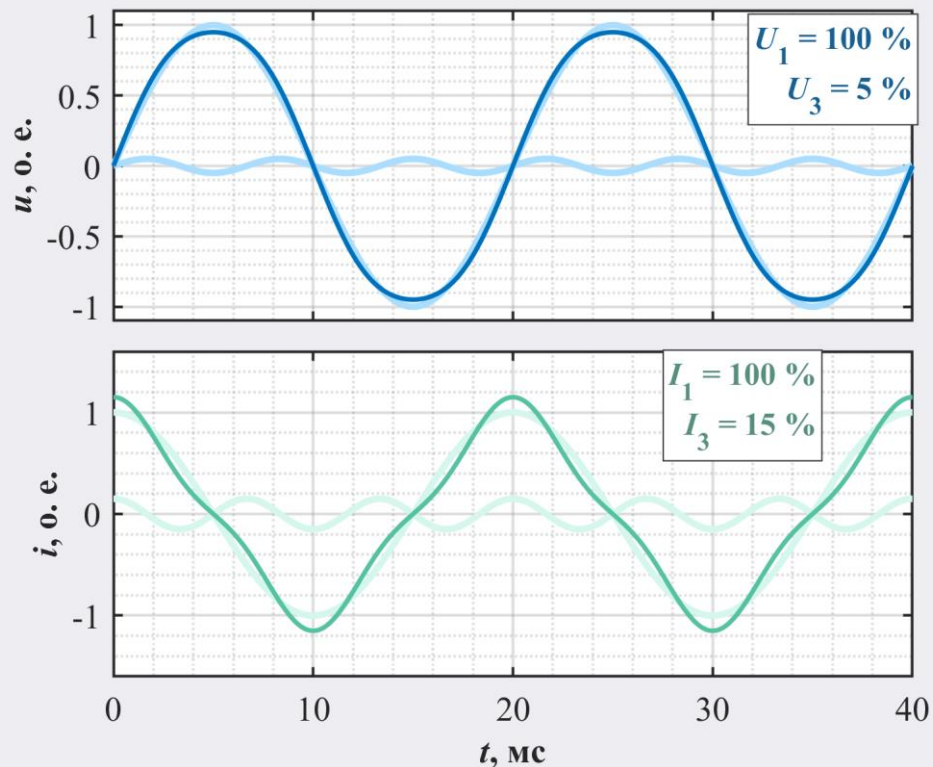
ϑ – степень расстройки компенсации;

$\delta_{\text{в.г.}}$ – отношение действующих значений тока высших гармоник и емкостной составляющей основной гармоники тока ОЗЗ.

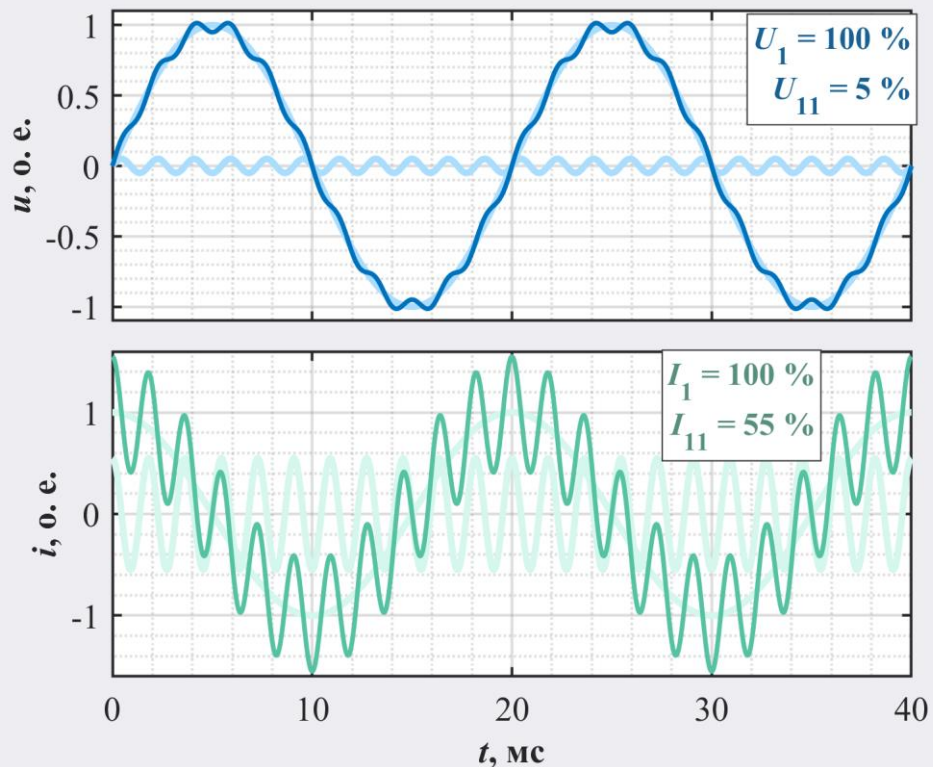
Полученное отношение наиболее полно характеризует эффективность компенсации в конкретной сети. Далее оно именуется как **коэффициент некомпенсированности k_δ** :

$$k_\delta = \sqrt{\delta_a^2 + \vartheta^2 + \delta_{\text{в.г.}}^2}.$$

Высшие гармоники в напряжении и токе ОЗЗ

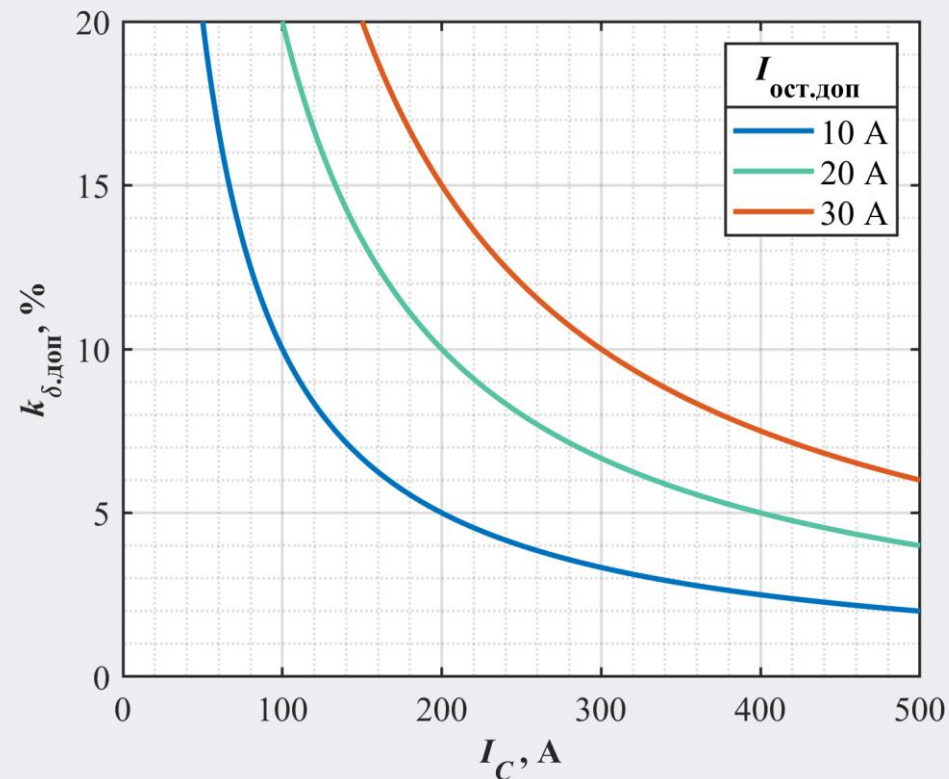


Расчетные осциллограммы параметров режима ОЗЗ; **3-я гармоника** напряжения сети составляет **5 %**

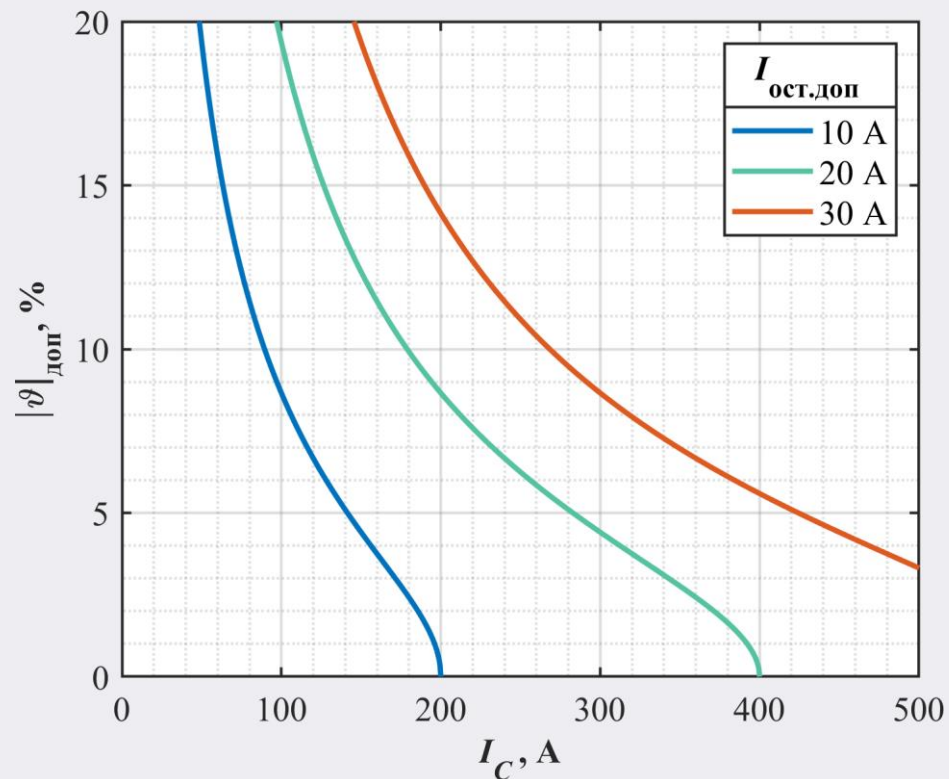


Расчетные осциллограммы параметров режима ОЗЗ; **11-я гармоника** напряжения сети составляет **5 %**

Допустимая некомпенсированность



Зависимость допустимого коэффициента некомпенсированности от емкостного тока

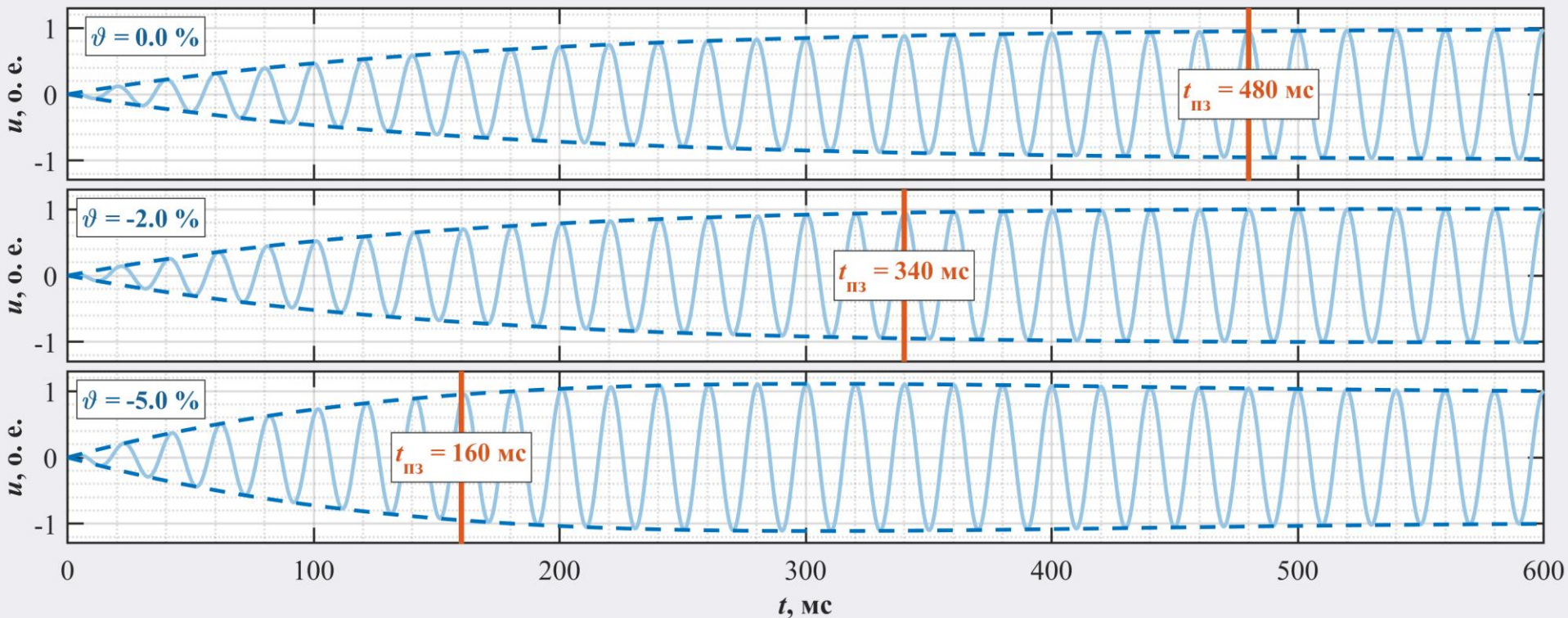


Зависимость допустимой степени расстройки компенсации от емкостного тока
(при $\delta_a = 5\%$ и $\delta_{в.г} = 0$)

Промежуточные выводы

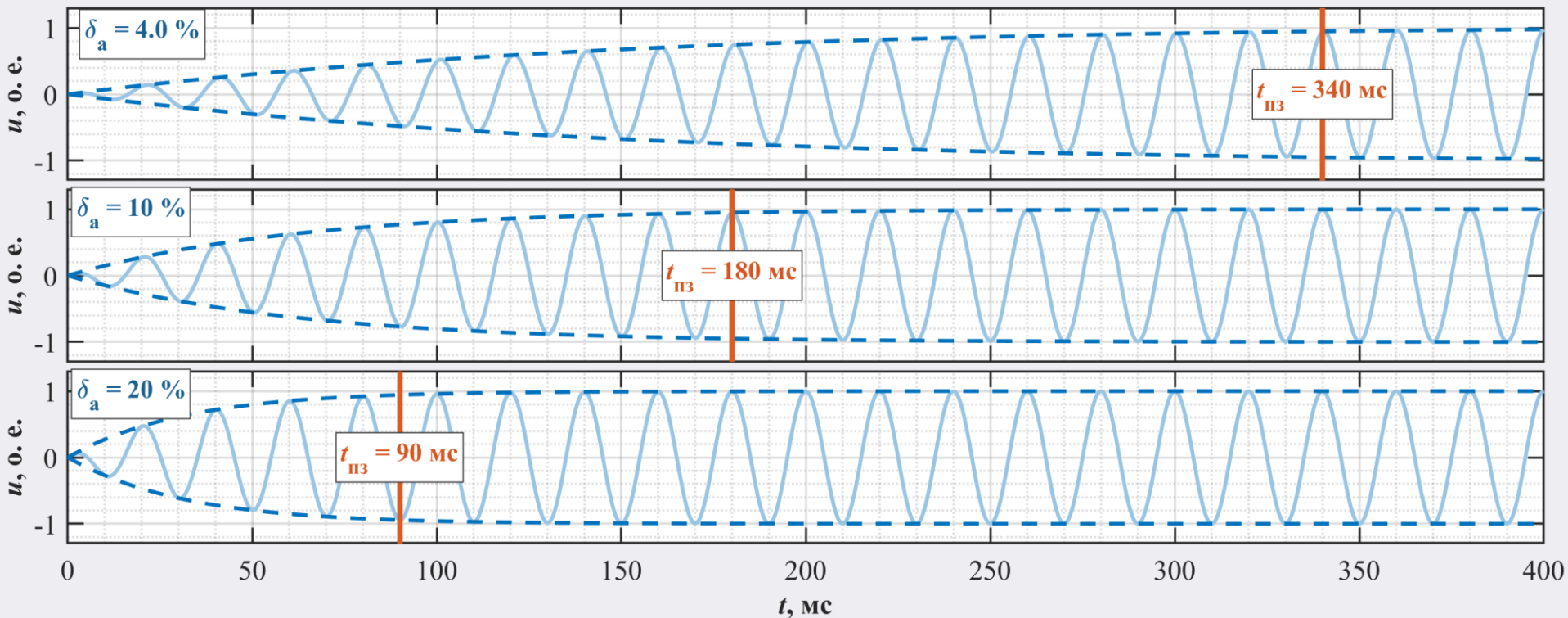
1. В сетях с большими емкостными токами ОЗЗ (сотни ампер на секцию) или большим уровнем гармоник (сети промышленных предприятий) уровень остаточного тока в месте замыкания превышает допустимый. Например, для сетей 10 кВ с емкостным током секции 400 А компенсация не обеспечивает необходимо малый уровень остаточного тока даже при идеальной настройке ДГР (из-за большой некомпенсируемой активной составляющей тока ОЗЗ).
2. Для городских кабельных сетей с большими емкостными токами и для сетей промпредприятий наиболее оправдано заземление нейтрали через низкоомный резистор с действием защиты от ОЗЗ на отключение поврежденного присоединения.
3. Для сетей, не требующих применения ДГР мощностью, превышающей примерно 1000 кВА, компенсация емкостных токов эффективна. Оценить предел эффективности компенсации для конкретной сети можно с помощью предложенного в докладе коэффициента некомпенсированности.

Восстановление напряжения поврежденной фазы после погасания дуги ОЗЗ



Влияние степени расстройки компенсации ϑ на скорость восстановления напряжения (коэффициент успокоения $\delta_a = 4 \%$; гашение при $t = 0$; повторное зажигание при $U = 0,95$ о. е.)

Восстановление напряжения поврежденной фазы после погасания дуги ОЗЗ



Влияние коэффициента успокоения δ_a на скорость восстановления напряжения (степень расстройки компенсации $\vartheta = -2\%$; гашение при $t = 0$; повторное зажигание при $U = 0,95$ o. e.)₈

О необходимости точной компенсации

Зависимость времени между повторными зажиганиями дуги τ от степени расстройки компенсации ϑ и коэффициента успокоения сети δ_a , была введена Ф. А. Лихачевым в его монографии [1]:

$$\tau = \frac{2}{\omega} \frac{\delta_a \pm 4(1 - \sqrt{1 - \vartheta})}{\delta_a^2 + 8(1 - \sqrt{1 - \vartheta})^2} \quad (1)$$

Формула (1), к сожалению, оказалась неверной. При этом, в этой же монографии выведена корректная зависимость от времени огибающей амплитуд восстанавливающегося напряжения поврежденной фазы, позволяющая безошибочно рассчитать кривые $\tau = f(\vartheta, \delta_a)$:

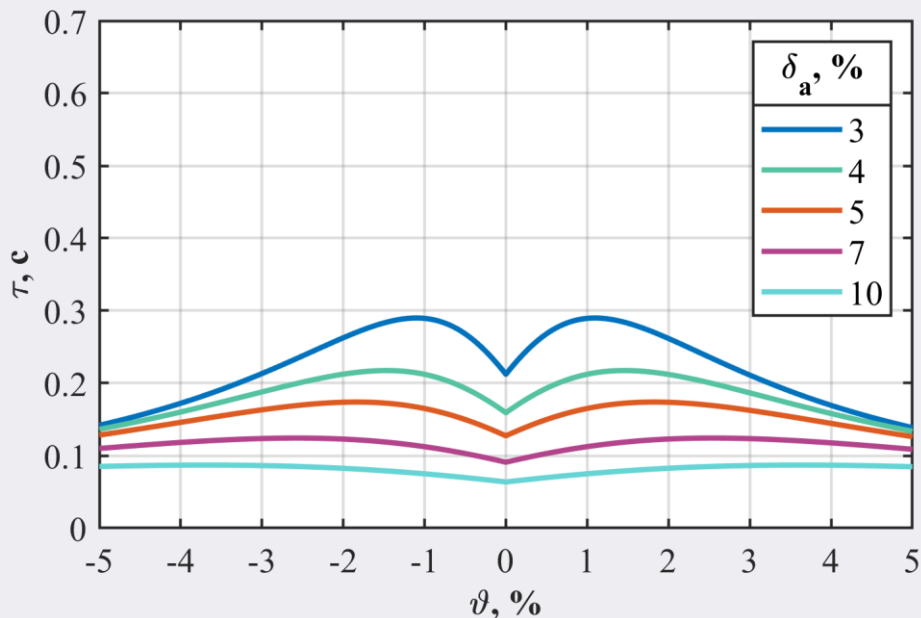
$$U_{ог}(t) = U_{фм} \sqrt{1 + \exp(-\omega \delta_a t) - 2 \exp\left(-\frac{\omega \delta_a}{2} t\right) \cos \omega(1 - \sqrt{1 - \vartheta})t} \quad (2)$$

Тем не менее, решение принять допустимую расстройку компенсации на уровне 5% было принято исходя из формулы (1).

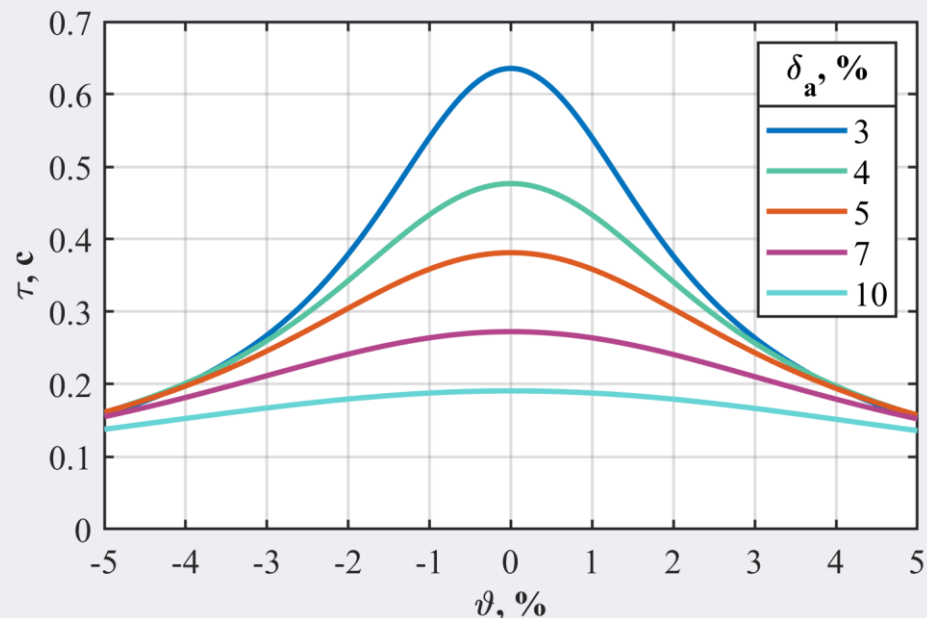
[1] Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с. с илл.

О необходимости точной компенсации

Точные расчеты зависимостей $\tau = f(\vartheta, \delta_a)$ подтверждают обоснованность ужесточения в СТО ПАО «Россети» [2] требований к допустимой степени расстройки компенсации (2%).



Зависимости $\tau = f(\vartheta)$ по формуле (1)



Зависимости $\tau = f(\vartheta)$ по формуле (2)

[2] СТО 34.01-3.2-008-2017 Стандарт организации ПАО «Россети». Реакторы заземляющие дугогасящие 6–35 кВ. Общие технические требования.

Смещение нейтрали в сети с несимметрией

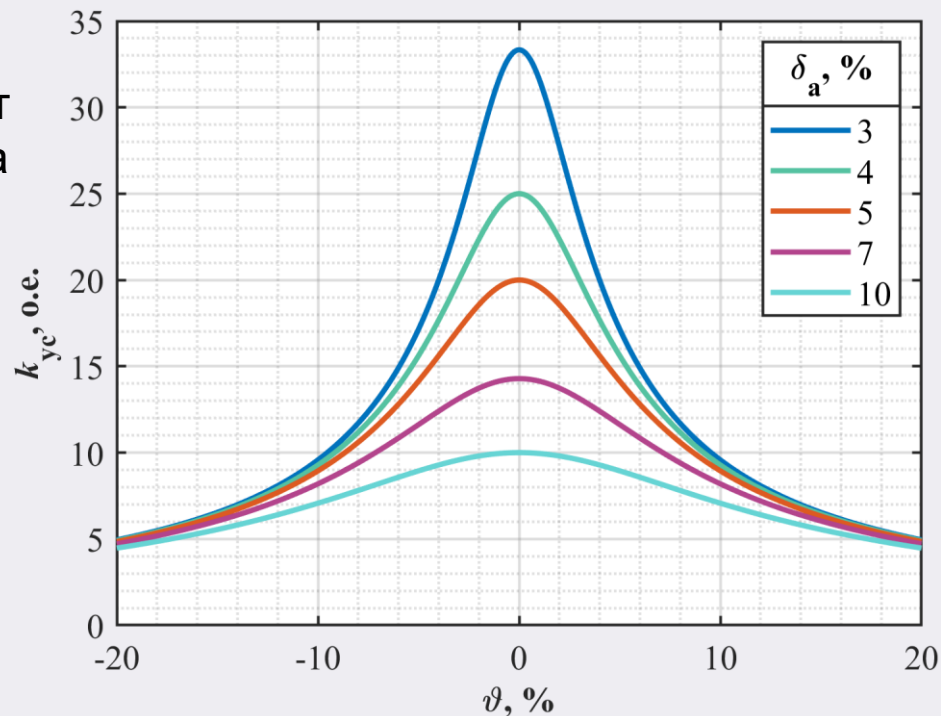
Кратность напряжения смещения изолированной нейтрали $k_{\text{нс}}$ (коэффициент несимметрии) в сети, у которой емкость на землю одной из фаз $C_{\phi 1}$ отличается от емкостей двух других $C_{\phi 2,3}$, определяется по формуле:

$$k_{\text{нс}} = \frac{|m-1|}{m+2}, \text{ где } m = \frac{C_{\phi 1}}{C_{\phi 2,3}}.$$

Заземление нейтрали через ДГР усиливает смещение нейтрали в $k_{\text{ус}}$ раз

$$k_{\text{ус}} = \frac{1}{\sqrt{g^2 + \delta_a^2}}.$$

Усиление смещения нейтрали дугогасящим реактором тем выше, чем точнее он настроен и чем меньше потери в сети.



Зависимости коэффициента усиления смещения нейтрали от степени расстройки компенсации $k_{\text{ус}} = f(g)$ для разных δ_a

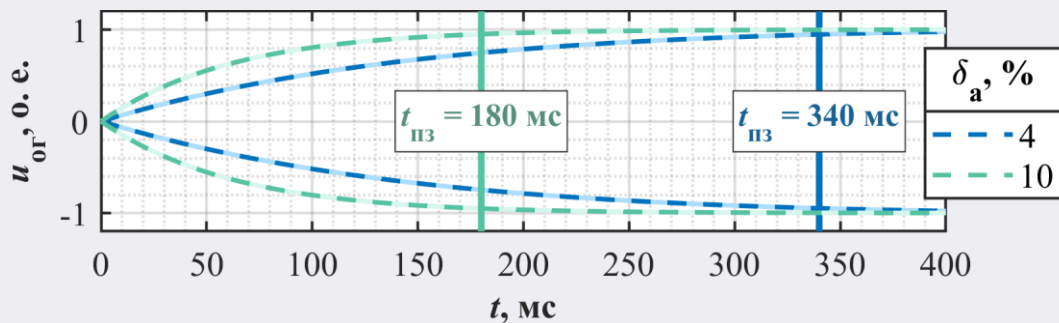
Смещение нейтрали в сети с несимметрией

Для снижения смещения нейтрали в несимметричной сети с ДГР необходимо либо увеличивать потери, либо искусственно вводить расстройку компенсации.

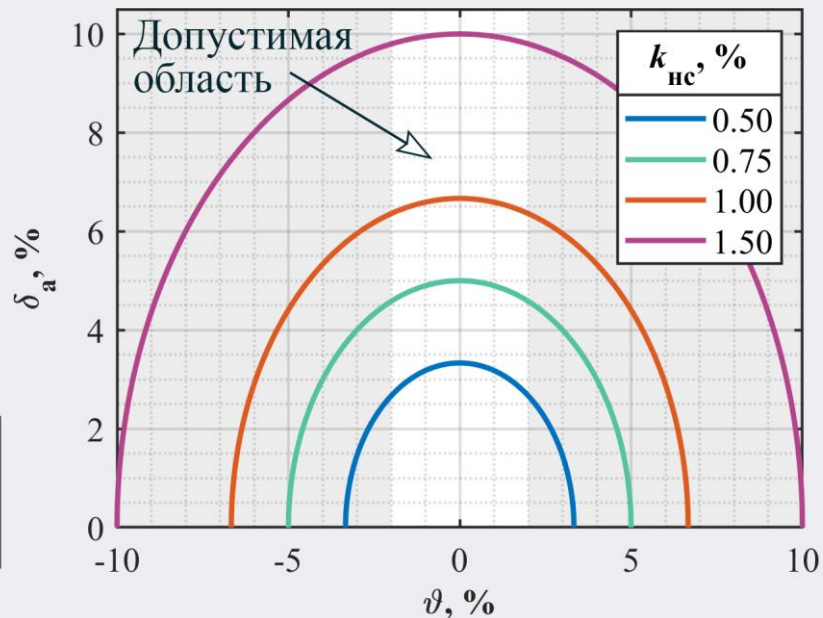
Минимальный коэффициент успокоения $\delta_{a.min}$, при котором кратность смещения нейтрали k_H не превышает допустимое значение $k_{H.доп}$:

$$\delta_{a.min} = \sqrt{\left(\frac{k_{Hc}}{k_{H.доп}}\right)^2 - g^2}$$

Например, при $k_{Hc} = 1,5\%$ и идеальной компенсации $\delta_{a.min}$ составит 10 %.



Огибающая восстанавливающегося напряжения



Зависимости $\delta_{a.min} = f(\vartheta)$ для разных k_{Hc} (при $k_{H.доп} = 15\%$)

Выводы для сетей с емкостной несимметрией

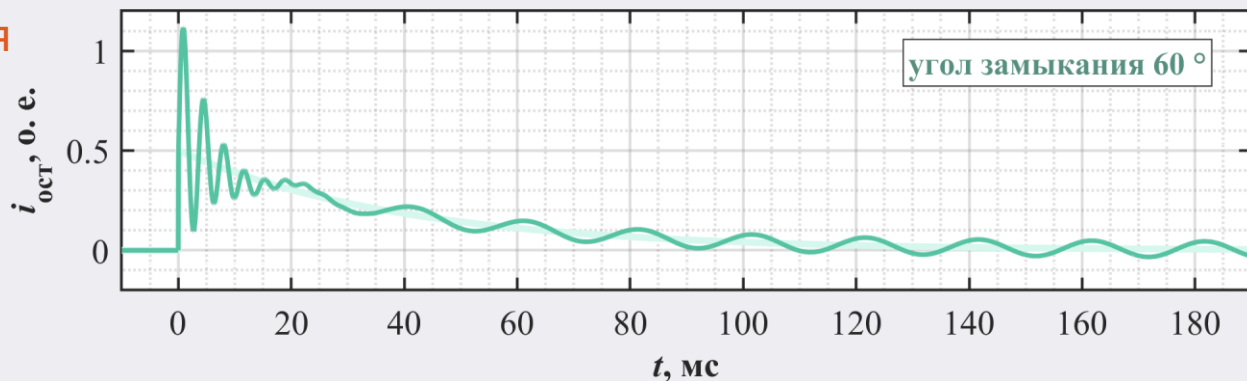
1. При использовании высокоомных резисторов параллельно ДГР для устранения смещения нейтрали нужно выбирать максимально возможное значение активного сопротивления высокоомного резистора. Чем больший активный ток привносит резистор, тем быстрее восстанавливается напряжение на поврежденной фазе после погасания дуги и тем хуже компенсация, что нивелирует положительные эффекты от реактора.

2. Хорошим решением по снижению уровня смещения нейтрали в несимметричной сети с ДГР, не влияющим негативно на эффективность режима компенсации, является применение **реакторов без резонансной настройки в нормальных режимах** сети. Как показано на следующем слайде, у таких ДГР есть 20–40 мс, чтобы выйти в режим точной настройки.

Выход на установившийся режим компенсации

В токе ДГР любого типа при ОЗЗ не в максимум напряжения появляется **апериодическая составляющая** с постоянной времени затухания, равной десяткам мс. Она протекает через место повреждения, **затягивая переход тока дуги через ноль** даже при условии идеальной настройки компенсации. Предельное значение апериодической составляющей (при замыкании в ноль напряжения) равно амплитуде индуктивного тока ДГР, а при сокращенных сечениях магнитопровода может в разы превышать это значение из-за насыщения.

Учитывая сказанное, точная компенсация в течение первых 20–40 мс после замыкания не является необходимой. В течение этого времени ДГР должен выйти на установившийся режим компенсации.



Расчетная осциллограмма остаточного тока замыкания в сети с идеальной компенсацией

Выводы

1. В кабельных сетях компенсация емкостных токов с помощью ДГР полноценно эффективна, если они соответствуют требованиям СТО «Реакторы заземляющие дугогасящие 6–35 кВ. Общие технические требования», а их мощность не превышает значения порядка 1000 кВА. Более точно оценить предельную мощность эффективного применения реактора можно с помощью предложенного коэффициента нескомпенсированности, учитывающего расстройку реактора, активный ток ОЗЗ и вклад высших гармоник.
2. Для воздушных и кабельно-воздушных сетей с ощутимой емкостной несимметрией плунжерные ДГР должны уступить либо низкоомным резисторам, либо ДГР новых конструкций, которые не создают в контуре нулевой последовательности резонансных условий в отсутствие ОЗЗ.
3. Актуальна работа по сбору, статистической обработке и анализу данных о предельных токах неустойчивого горения дуги в воздушных и кабельных сетях для уточнения нижней границы области применения ДГР.

Спасибо за внимание!

dmatveev@tvn-moscow.ru

retz@ramenergy.ru