

# РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ И ВСТАВКАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

АВТОР:

Р.Н. ШУЛЬГА, К.Т.Н.,  
ВЭИ — ФИЛИАЛ ФГУП  
«РФЯЦ — ВНИИФ  
ИМ. АКАД.  
Е.И. ЗАБАБАХИНА»

**Р**езонанс — явление в электрической цепи, содержащей участки, имеющие индуктивный и емкостной характер, при котором разность фаз синусоидального электрического напряжения и синусоидального электрического тока на входе цепи равна нулю.

**Ключевые слова:** резонансное явление; конечное устройство; фильтр; передача и вставка постоянного тока.



Резонансные явления на линиях электропередачи являются причиной недопустимых перенапряжений и повреждений изоляции

Резонансные явления на линиях электропередачи постоянного и переменного тока (соответственно на передачах постоянного тока — ППТ и линиях электропередачи — ЛЭП) могут привести к недопустимым перенапряжениям и повреждениям изоляции и оборудования подстанций (ПС), причем наиболее опасными являются резонансы на сетевой частоте и низших возмущающих гармониках. Демпфирующий эффект активных сопротивлений на этих частотах недостаточен, т. к. требуемая их мощность должна быть сопоставима с мощностью электропередачи. Единственной возможностью недопущения таких опасных явлений является отстройка собственных частот электропередач от возмущений на 1–5-й гармониках сетевой частоты. Четные гармоники обычно невелики, не возникают в симметричных режимах и менее характерны для энергосистем.

Если ЛЭП в силу меньшей их длины практически не попадают в зону опасных гармоник, то для ППТ большей длины, а также при наличии кабельных линий (КЛ) такие явления вполне реальны. Многообразие схемных решений и режимов работы электропередачи способствует возникновению резонансных явлений. Преобразователи ППТ сами генерируют четные гармоники на сторону постоянного тока и нечетные гармоники на сторону переменного тока, которые должны быть ограничены до допустимого уровня, обычно не превышающего 5%, с помощью фильтров в установленных режимах. В переходных и аварийных режимах ограничение указанных гармоник не лимитируется и обеспечивается только отстройкой собственных частот от возмущающих гармоник.

Следует учитывать, что на ЛЭП по сравнению с ППТ менее вероятно возникновение резонансов не только из-за меньшей их длины, но и благодаря меньшему числу возможных режимов коммутаций (включения

и отключения), а также несимметричных коротких замыканий (КЗ). В ППТ к указанным режимам добавляются аварийные режимы пропусков отпирания вентилей, опрокидывания инверторов и др. Несмотря на наличие эффективно работающих регуляторов и систем защиты и автоматики, резонансные перенапряжения могут достигнуть опасных значений в интервале действия защит, которые обычно не превышают 0,1 с.

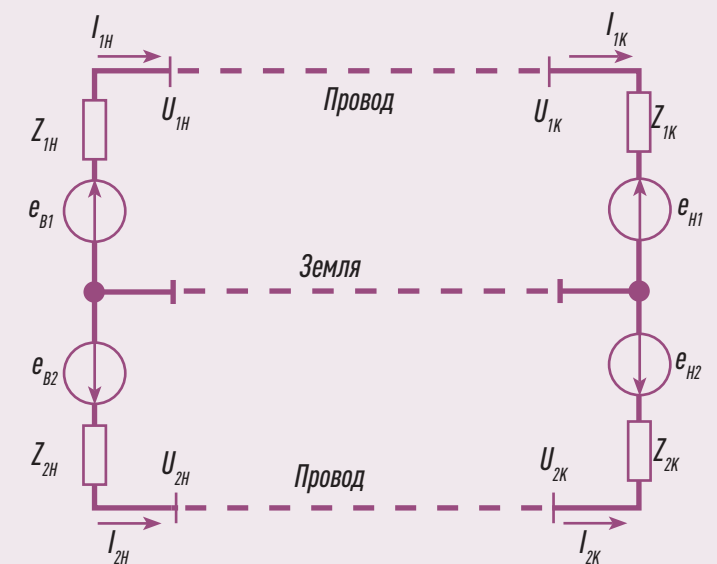
При заданной длине и мощности ППТ единственным средством отстройки от резонанса является выбор конечных разделительных устройств, которые включают сглаживающие реакторы и фильтры высших гармоник (обычно 12-й и ей кратных). Сглаживающие реакторы (далее — реакторы) практически определяют индуктивность конечных устройств и являются главным фактором огра-

ничения гармоник тока, отсутствия резонансных усилений составляющих тока и напряжения, генерируемых преобразователем.

Реактор вместе с ограничителем перенапряжения (ОПН), установленным на полюсе линии ППТ (входит в состав преобразовательной ПС, ограничивает скорость нарастания грозового импульса (ГИ) и амплитуду ГИ до значения, несколько превышающего защитный уровень ОПН).

Если схемотехнике и режимам работы ППТ посвящено достаточно много работ [1–4], то вопросы резонансных явлений в ППТ и ЛЭП отражены в публикациях Р.Н. Шульги и соавт. [5, 6] в части выбора конечных устройств на примере ППТ Экибастуз — Центр мощностью 6 ГВт и Выборгской вставки постоянного тока (ВПТ) мощностью 1,5 ГВт.

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ БИПОЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Обозначения:  $e_{B1}, e_{B2}, e_{H1}, e_{H2}$  — э. д. с. преобразователей;  $Z_{1H}, Z_{2H}, Z_{1K}, Z_{2K}$  — комплексное сопротивление конечных устройств;  $U_{1H}, U_{2H}, U_{1K}, U_{2K}$  — напряжение в начале и конце линии;  $I_{1H}, I_{2H}, I_{1K}, I_{2K}$  — токи в начале и конце линии.

Рис. 1

## ГРАФИК ДЛЯ ВЫБОРА ИНДУКТИВНОСТЕЙ $L_k$ КОНЦЕВЫХ УСТРОЙСТВ, ОТСТРОЕННЫХ ОТ РЕЗОНАНСА

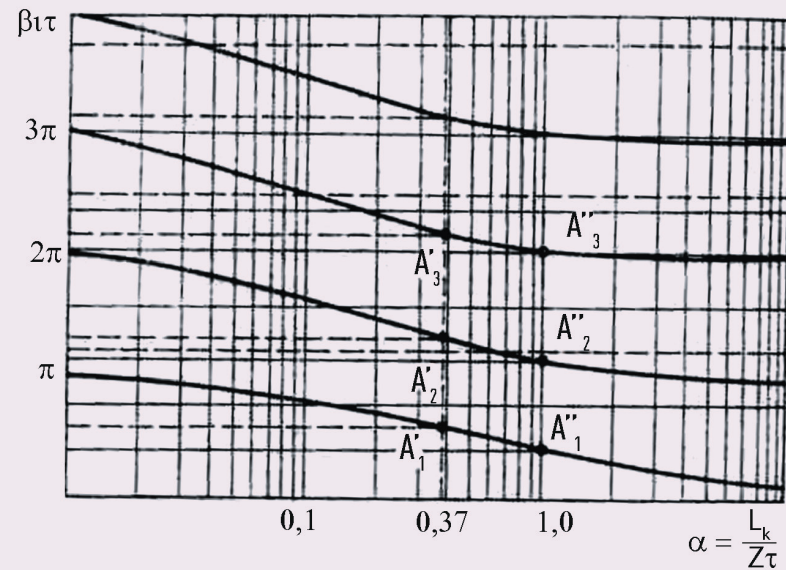


Рис. 2

## РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ППТ

Резонансные явления задают уровень перенапряжений и взаимного влияния полупецей ППТ Экибастуз — Центр с воздушной линией (ВЛ) длиной 2500 км.

Исследуемая схема ППТ в составе двух полупецей представлена на рис. 1. Концевые устройства варьируют, имеют одинаковые параметры и равны:

$$Z_k = pL_k + R_k, \quad (1)$$

где  $Z_k$  — полное сопротивление концевых устройств;  $L_k, R_k$  — соответственно индуктивность и активное сопротивление концевых устройств, включая

эквивалентные сопротивления преобразователей.

ЭДС выпрямителя и инвертора (соответственно  $e_a$  и  $e_{in}$ ) обеспечивают протекание постоянного тока  $I_d$  по проводам обеих полупецей, минуя землю.

Для изображений токов, протекающих через концевые устройства, справедливы следующие соотношения:

$$I_{in} = \frac{e_{in} - U_{in}}{Z_k}, \quad I_{ik} = \frac{U_{ik} - e_{in}}{Z_k}, \quad (2)$$

где  $l = 1, 2$ .

Связь между реальными и условными изображениями напряжений токов отражена в уравнениях [6]:

$$U_{1x} + U_{2x} = U'_x;$$

$$I_{1x} + I_{2x} = I'_x;$$

$$U_{1x} - U_{2x} = U''_x; \quad (3)$$

$$I_{1x} - I_{2x} = I''_x,$$

где  $x$  — координата линии.

При использовании уравнений (3) первичные параметры линии преобразуются относительно контуров провод — провод и провод — земля к виду

$$r' = r_n + 2r_s, \quad L' = L_n + 2L_s, \quad C' = C_n, \\ r'' = r_n, \quad L'' = L_n, \quad C'' = C_n + 2C_{np}, \quad (4)$$

где  $r_n, r_s$  — активные сопротивления провода и земли;  $L_n, L_s$  — взаимные индуктивности контуров провод — провод и провод — земля;  $C_n, C_{np}$  — емкости проводов на землю и между проводами.

Изображения напряжения в произвольной точке линии с координатой  $x (U'_x, U''_x)$  имеют вид:

$$U'_x = U'_n ch v'x - I'_n Z' sh v'x, \\ U''_x = U''_n ch v''x - I''_n Z'' sh v''x. \quad (5)$$

Для упрощения записи принято обозначение индекса  $j$  вместо (') и (");  $v^j x, Z^j$  — соответствующие операторные волновые длина и сопротивление контура с соответствующим индексом, которые связаны с первичными параметрами линии длиной  $l$  следующим образом:

$$v^j l \approx \tau^j (p + \alpha^j), \quad (6)$$

где  $\tau^j = l\sqrt{L^j C^j}$  — время пробега волны в контуре с индексом  $j$ ;  $a^j = r^j/2L^j$  — затухание в соответствующем контуре;  $Z^j = \sqrt{L^j/C^j}$  — волновое сопротивление контура.

Для аварийной первой полупецей при возмущении со стороны инвертора  $e_{in}$  получим операторные выражения в соответствии с уравнением [6]:

$$U_{1x} = \frac{1}{2} e_{in} \left[ \frac{V'_x(p)}{W'(p)} + \frac{V''_x(p)}{W''(p)} \right], \\ I_{1x} = \frac{1}{2} \frac{e_{in}}{Z_k} \left[ \frac{D'_x(p)}{W'(p)} + \frac{D''_x(p)}{W''(p)} \right], \quad (7)$$

$$\text{где } V_x(p) = ch vx + \frac{Z}{Z_k} sh vx,$$

$$D_x(p) = ch vx + \frac{Z_k}{Z} sh vx.$$

Так как активные сопротивления мало влияют на собственные частоты  $\beta_i \tau$ , то эти частоты могут быть найдены путем решения следующего уравнения:

$$2 \cos \beta_i \tau + \left( \frac{Z}{\beta_i L_k} - \frac{\beta_i L_k}{Z} \right) \sin \beta_i \tau = 0, \quad (8)$$

которое приводится к виду

$$ctg \frac{\beta_i \tau}{2} = \frac{\beta_i L_k}{Z}, \quad tg \frac{\beta_i \tau}{2} = -\frac{\beta_i L_k}{Z}. \quad (9)$$

Определив значения  $a' = Lk/Z'\tau'$  и  $a'' = Lkj/2Z''\tau''$  по графику  $\beta_i \tau = f(a)$ , представленному на рис. 2, найдем значения собственных частот для каждого из контуров биполярной электропередачи.

Амплитуды свободных составляющих процесса обратно пропорциональны величине  $(\beta_i^2 - \omega^2)$ , где  $\omega$  — возмущающие частоты 1, 2, 3-й гармоник, поэтому для снижения перенапряжений необходимо отстроить собственные частоты передачи от частоты возмущений. Из рис. 2 можно определить отстройку от резонанса выбором индуктивности концевых устройств. На этом графике показаны в виде прямых, параллельных оси абсцисс, первые три значения возмущающих частот 1–3-й гармоник в виде сплошных линий для контура, обозначенного индексом ("), штриховых — для контура ('). Максимальная величина  $L_k$  быть выбрана с учетом возможной реализации.

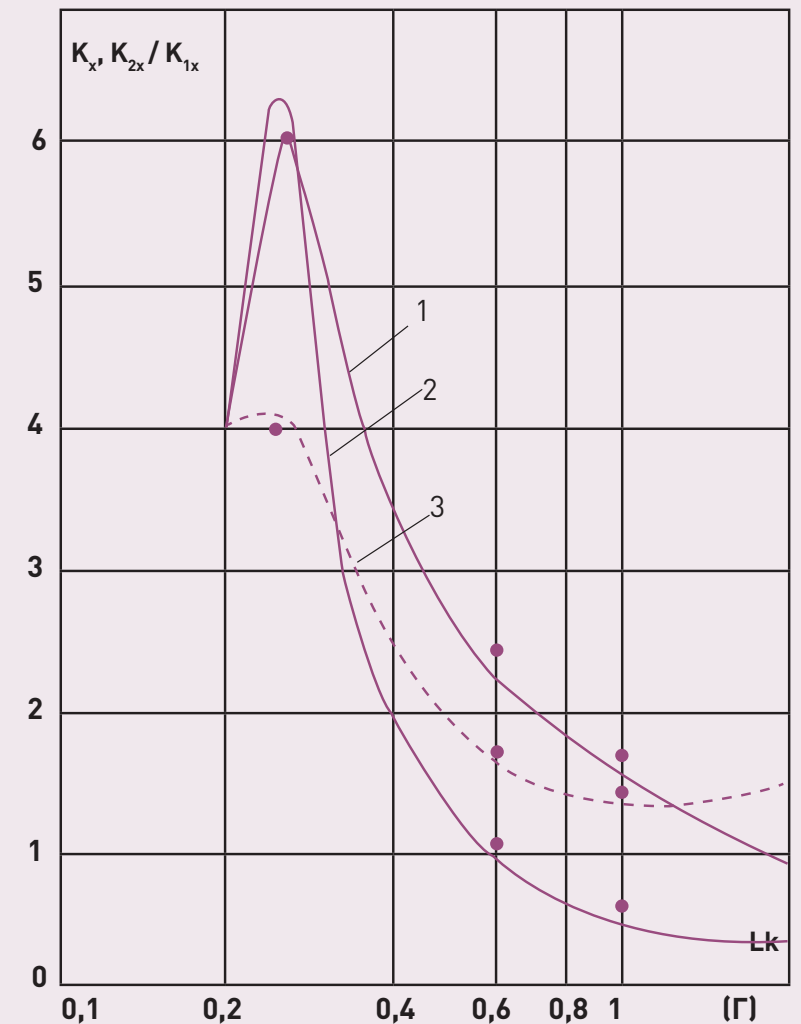
Надежность работы ППТ обеспечивается минимальным влиянием

процесса в аварийной полупецей на неповрежденную полупецей, которое отражается операторным коэффициентом взаимного влияния полупецей  $K_{21x}$ :

$$K_{21x} = \frac{K_{2x}(p)}{K_{1x}(p)}, \quad (10)$$

где  $K_{1x} = U_{1x} I e_{in1}$ ,  $K_{2x} = U_{2x} I e_{in1}$  — соответственно операторные коэффициенты передачи, характеризующие величину напряжения в произвольной точке первой и второй полупецей при возмущении со стороны инвертора первой полупецей. Коэффициент вза-

## КРАТНОСТЬ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И КОЭФФИЦИЕНТ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ПОЛУПЕЦЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ $L_k$ ( $x = l/2$ ) БЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ПС



Обозначения: 1 — уровень перенапряжений в поврежденной полупецей ( $K_{1x}$ ); 2 — уровень перенапряжений в неповрежденной полупецей ( $K_{2x}$ ); 3 — коэффициент взаимного влияния полупецей  $K_{2x}/K_{1x}$ .

Рис. 3

имного влияния  $K_{21x}$  при неизменной длине электропередачи определяется величиной  $L_x$  и видом возмущения.

На рис. 3 представлены графики уровней перенапряжений и коэффициента взаимного влияния полупедей, полученные на основе математической модели ППТ. При этом полагалось, что  $e_{v2} = e_{i2} = 0$ , т.е. второй провод линии заземляется через концевые устройства. Уровень перенапряжений равен:

$$K_x = \frac{U_{\text{хмакс}}}{U_{\text{хном}}} \quad (11)$$

где  $U_{\text{хмакс}}$ ,  $U_{\text{хном}}$  — соответственно максимальное и номинальное значения

напряжения. Кривые, приведенные на рис. 3, построены для координаты  $x = l/2$  (середина линии) с наибольшими напряжениями. Из рис. 3 следует, что условия снижения перенапряжений и взаимного влияния полупедей достигаются отстройкой ППТ от резонанса с частотой 1-й гармоники.

При работе обеих полупедей с постоянными составляющими напряжения

$$K_{2x} \approx 1 + K_{2x'}$$

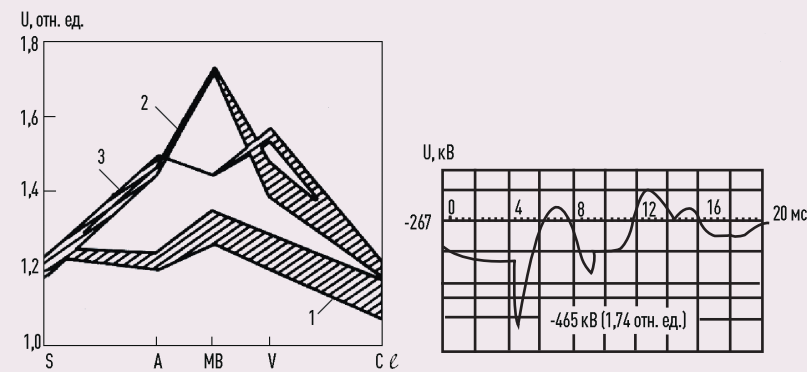
где  $K_{2x}$  — максимальный уровень перенапряжения второй полупедей, представленный на рис. 3.

## СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ ППТ, ГЦ

$L_d$ , Гн	N	1	2	3	4
1	Конт. (°)	34,1	80,6	140	199
	Конт. (°)	31,8	66,2	103,5	142
0,3	Конт. (°)	50	102	157	209
	Конт. (°)	39	78,6	118	158

Таблица 1

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ U, ОТН. ЕД. ПО ДЛИНЕ L ППТ PACIFIC INTERTIE ПРИ КЗ



Обозначения: 1 — на выпрямителе, 2 — в середине ВЛ, 3 — 1/3 длины от конца ВЛ (а); форма перенапряжения на неповрежденном полюсе при КЗ на землю в середине ВЛ (б).

Рис. 4

**Пример.** Для ВЛ постоянного тока «Экибастуз — Центр» длиной 2500 км удельные параметры провода 4 АСО-1200 таковы:

- сопротивление — 0,008 Ом/км;
- индуктивность — 0,82 мГн/км;
- емкость между проводами — 0,001 мкФ/км;
- удельные параметры земли:
- сопротивление — 0,05 Ом/км;
- индуктивность — 0,67 мГн/км;
- емкость провода на землю — 0,01 мкФ/км.

С помощью уравнения (6) получают значения волновых параметров в контуре провод — провод, равные  $Z'' = 540$  Ом,  $\tau'' = 7,85$  мс, в контуре два провода — земля, равные  $Z' = 230$  Ом,  $\tau' = 11,6$  мс.

Для режима работы ППТ в биполярном режиме (основная схема) при индуктивностях  $L_d = 0,3$  и 1 Гн собственные частоты ППТ в соответствии с рис. 2 даны в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что для ППТ длиной 2500 км индуктивность реакторов  $L_d$ , равная 0,3 Гн, настраивает в резонанс электропередачу на первые четыре гармоники сети, и перенапряжения без учета активных сопротивлений могут достигнуть кратности до 6 отн. ед., а влияние полупедей — до 4 отн. ед. (см. рис. 3). Влияние регуляторов [6, 8] наиболее сильно уменьшает кратность перенапряжений в резонансных режимах, а при отстройке от резонанса влияние регуляторов ослабевает. Отстройка от резонанса при  $L_d$ , равной 1 Гн, снижает перенапряжения до 1,7 отн. ед., а влияние полупедей до 1,4 отн. ед. при заметно меньшем влиянии регуляторов с коэффициентом усиления 0,1 гр/А и постоянной времени 1 мс. Наибольшие перенапряжения возникают в середине ВЛ, а по концам снижаются до значений существенно меньше уставки ОПН.

При работе ППТ одной полупедей (пусковой и ремонтный режимы)

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЧЕТЫРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТР

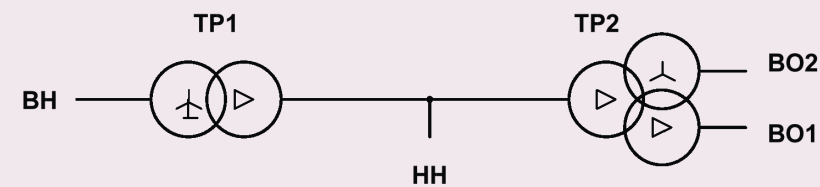


Рис. 5

используется рис. 2 для одного контура с волновым сопротивлением  $Z = 400$  Ом. При замене ВЛ на КЛ следует принять  $Z = 20 \div 30$  Ом для кабеля и пересчитать значения собственных частот по уравнениям (9) и рис. 2.

## СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ РАЗЛИЧНЫХ ППТ

Собственные частоты ППТ определяются, главным образом, длиной ЛЭП и индуктивностью сглаживающих реакторов, причем последняя слабо изменяет эти частоты, особенно при большой длине ЛЭП. Для ЛЭП длиной 1,5 тыс. км собственные частоты близки к 50, 100, 150 Гц, что наиболее опасно для изоляции ЛЭП.

Наоборот, с уменьшением длины ЛЭП до величины ниже 1,5 тыс. км возможно приближение к резонансу первой собственной частоты на 2-й и 3-й гармониках. Так, ППТ Itaipu (Бразилия) длиной 800 км при индуктивности сглаживающих реакторов 0,3–0,6 Гц оказывается настроенной на 2-ю гармонику. Аналогичную настройку имеет ППТ Волгоград — Донбасс длиной 470 км с индуктивностью 1,0 Гц. Собственная частота ППТ Pacific Intertie (США) длиной 1400 км также близка к сетевой частоте 60 Гц.

КЗ одного из полюсов биполярной ППТ создает волну перенапряжения с ко-

ротким фронтом, которая распространяется в обе стороны от места КЗ. При ее распространении в неповрежденном полюсе ППТ за счет индуктивной и емкостной связи между проводами и землей наводятся импульсные перенапряжения, которые распространяются по неповрежденному полюсу и, отражаясь от концевых устройств, вызывают перенапряжения довольно сложной формы и высокой амплитуды.

На рис. 4 а приведено распределение перенапряжений  $U$  в неповрежденном полюсе по длине  $l$  ППТ Pacific Intertie длиной 1400 км при КЗ в различных точках ЛЭП. Заштрихованные зоны соответствуют изменению уровня рабочего напряжения ППТ. На рис. 4 б приведена форма перенапряжения на неповрежденном полюсе при КЗ на землю в середине другого полюса.

Первоначальный подъем напряжений обусловлен емкостной связью между полюсами, в то время как последующие колебания вызваны индуктивной связью, причем спустя 10 мс после прихода отраженной от концов линии волны возникает дополнительный пик с последующими колебаниями. Из осциллограммы видно, что наибольшая амплитуда перенапряжения равна 1,74 отн. ед., в то время как без учета потерь — 2,04 отн. ед. Учет потерь снижает перенапряжения до 2 отн. ед., а учет частотно-зависимых параметров земли — до 1,9 отн. ед.

В случае неоднородной ВЛ постоянного тока типа воздушно-кабельной линии анализ собственных частот и переходных процессов существенно осложняется и зависит не только от соотношения длин соответствующих участков, но и от места их расположения. В результате необходимо привлечение математических моделей ППТ как для анализа частотных характеристик, так и для выбора настроек регуляторов.

Для длинных ППТ влияние фильтров и конденсаторов по концам линии на частотную характеристику ППТ в области первых собственных частот практически отсутствует благодаря разделению собственных частот фильтров, отличающихся на порядок от собственных частот ВЛ. Для коротких ЛЭП влияние

## РАСЧЕТНАЯ СХЕМА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

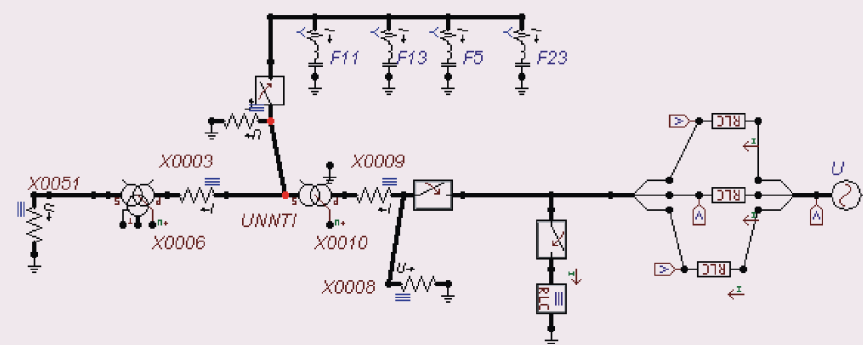


Рис. 6

### ТОКИ ОБМОТКИ НН ТР В РЕЖИМЕ 1

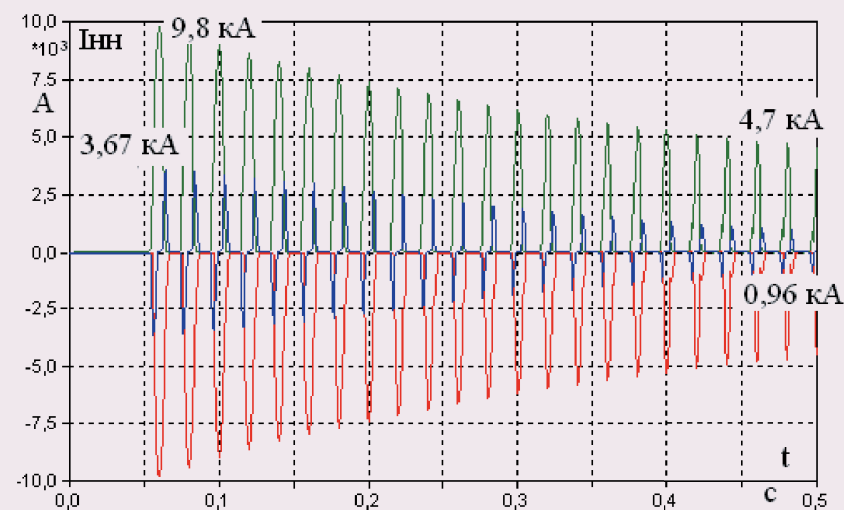


Рис. 7

фильтров должно быть учтено при определении собственных частот ППТ.

## РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА СТОРОНЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ППТ И ВПТ

На стороне переменного тока преобразователи ПС генерируют практически только нечетные гармоники  $12 \text{ к} \pm 1$ , которые близки к собственной частоте примыкающей сети, лежащей в диапазоне 3–5-й гармоник сетевой частоты. В ряде случаев при использовании многообмоточных трансформаторов (ТР) конденсаторные батареи (КБ) для компенсации реактивной мощности или КБ фильтров (КБФ), настроенные на 5, 11, 13-ю гармоники и широкополосный фильтр 23-й гармоники, подключаются к специально выделенной обмотке низкого напряжения (НН) ТР.

В такой схеме возможно подключение ТР к сети переменного тока с подключенными КБФ. Для примера

можно рассмотреть схему замещения четырехобмоточного трансформатора ОДЦТНП-135000/330/110–78У1 для ПС мощностью 405 МВА Выборгской ВПТ.

В силу особенности конструкции ТР требуется получить нулевое значение реактанса обмотки НН, предназначен-

ной для подключения КБФ, и эта обмотка располагается между обмотками высокого напряжения (ВН) и вентиляемыми обмотками (ВО). Схема замещения такого трансформатора, пригодная для его математического моделирования, приведена на рис. 5 и разбита на две части:

- ТР1 — трехфазный двухобмоточный трансформатор, моделирующий схему соединения обмоток ВО — звезда с заземленной нейтралью, НН — треугольник, коэффициент трансформации и реактанс КЗ — ВН/НН;
- ТР2 — трехфазный трехобмоточный трансформатор с моделированием ветви намагничивания.

Математическая модель в программном комплексе АТР-ЕМТР сети ВН с четырьмя примыкающими ЛЭП 330 кВ приведена на рис. 6 [10]. В модели, кроме ТР, добавлена модель системы ( $E_s, X_s$ ), КБФ и коммутационная аппаратура в виде выключателей.

В приведенной модели даны расчеты следующих коммутационных режимов:

### ТОКИ СО ТР В РЕЖИМЕ 2

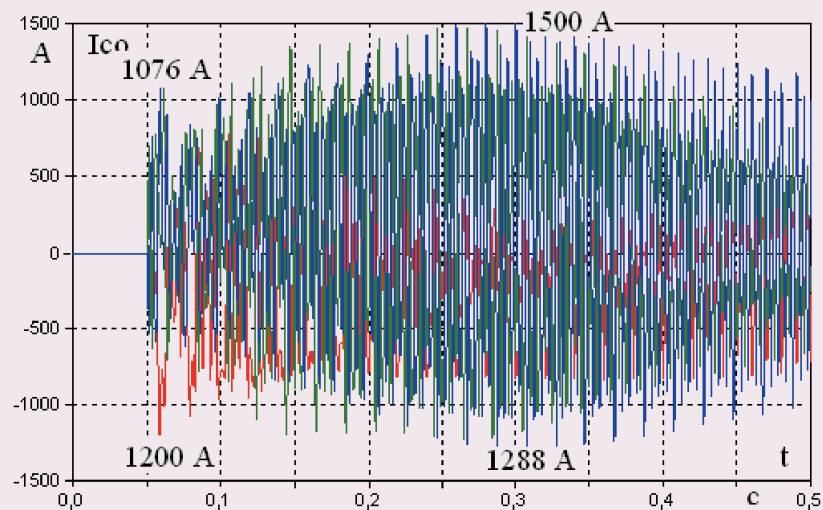


Рис. 8

### НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБМОТКЕ НН ТР В РЕЖИМЕ 2

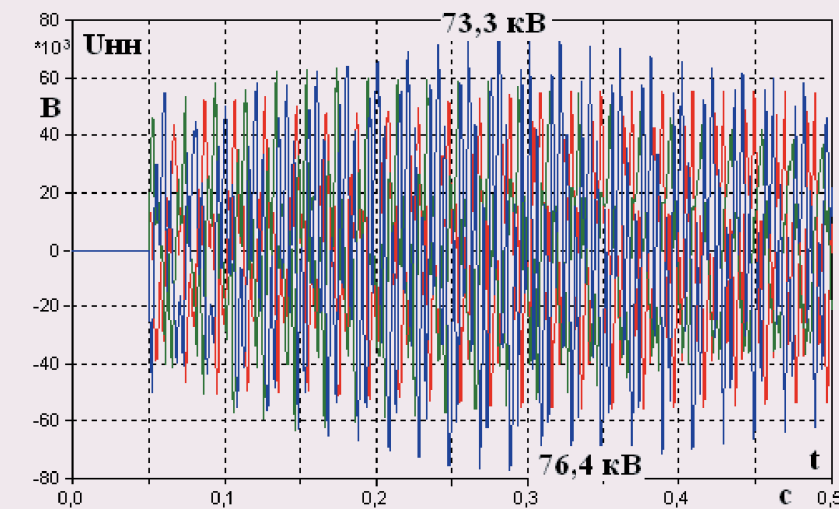


Рис. 9

1 — подключение трансформатора к сети при отключенных КБФ;

2 — подключение трансформатора к сети при подключенных КБФ.

В режиме 1 наибольшая амплитуда тока в одной из фаз превышает амплитуду номинального тока сетевых обмоток (СО) примерно на 30%. Процесс затухания тока  $X$  длится примерно 3–3,5 с и представлен на рис. 7. Амплитудное значение первого броска тока намагничивания, приведенное к обмотке НН, более чем на 60% превышает амплитуду номинального тока. Наблюдается сильное искажение формы фазных напряжений, связанное с нелинейностью характеристики намагничивания.

На рис. 8, 9 показаны осциллограммы процессов в трансформаторе при его подключении к сети с КБФ, присоединенной к обмотке НН (режим 2).

На рис. 8 приведены осциллограммы токов СО в режиме 2. Если при включении трансформатора на  $X$  первый бросок тока не превышал  $1,3 I_{баз}$ , то теперь он возрос до  $1,45 I_{баз}$ . Однако в дальнейшем наблюдается значительный рост тока. Через несколько периодов он достигает величины  $1,81 I_{баз}$  и сохраняется на этом уровне в течение 10–15 периодов, достигая установившегося уровня через 2–3 с.

На рис. 9 приведены осциллограммы фазных напряжений обмотки НН, что соответствует напряжению на конденсаторных батареях фильтров. Амплитуда напряжения достигает величины  $2,43 U_{баз}$  и удерживается на этом уровне в течение тех же 10–15 периодов, постепенно снижаясь до уровня, который на 5–6% выше номинального значения.

Резонансные повышения тока и напряжения на обмотке НН ТР представляют опасность для конденсаторов КБФ и должны быть учтены при проектировании ПС ППТ и ВПТ.

## ВЫВОДЫ

1. Выбор параметров концевых устройств должен осуществляться путем исследования резонансных режимов на стороне постоянного тока ППТ и отстройки их от резонанса на первых пяти гармониках сетевой частоты.
2. Резонансные явления на стороне переменного тока ППТ и ВПТ должны исследоваться с учетом параметров примыкающей сети с учетом линий ВН, преобразовательных трансформаторов и фильтров высших гармоник. Указанные явления сопровождаются существенными перегрузками конденсаторов фильтров и должны быть учтены при проектировании подстанций ППТ и ВПТ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Padiyar K.R. HVDC Power Transmission Systems Technology and System Interactions. New Age International (P) Ltd. Publishers, New Delhi, 2005.
2. Поссе А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока. М.: Энергия, 1973.
3. Melvold D.J., Long W.F. Back-to-back HVDC System performance with different smoothing reactors//IEEE

4. Шульга Р.Н., Иванова Е.А., Лозина Н.Г., Мазуров М.И. Выбор индуктивностей концевых/распределительных устройств электропередач и вставок постоянного тока//Электротехника. 2011. № 9. С. 20–26.
5. Шульга Р.Н., Шульга А.Р. Опыт эксплуатации оборудования КВПУ Выборгской ВПТ и рекомендации по перспективным ВПТ//Электротехника. 2011. № 9. С. 40–44.
6. Шульга Р.Н. О методике исследования переходных процессов в электропередаче постоянного тока с учетом действия регулирующих устройств//Труды ВЭИ. 1976. Вып. 84. С. 93–101.
7. Шульга Р.Н., Сулова О.В. Технико-экономические характеристики электропередач и вставок постоянного тока//Известия НТЦ ЕЭС. 2017. № 76. С. 125–139.
8. Шульга Р.Н., Дружинин М.Ю. Анализ средств управления режимами работы кабельных и воздушных линий электропередач постоянного тока//Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 8. С. 50–63.
9. Шульга Р.Н., Дружинин М.Ю. Сопоставительный анализ средств продольной и поперечной компенсации переменного тока//Доклад на XXVI Международной научно-технической и практической конференции ТРАВЭК. Москва, 8–9 ноября 2017 г.
10. Программа ATP Rule Book/Leuven EMTP Center, 1992. Р. 247.
11. Шульга Р.Н., Смирнова Т.С. Вклад ВЭИ в технику постоянного тока высокого напряжения//Энергоэксперт. 2021. № 3. С. 8–14.