

## Пропускная способность межсистемных электропередач в условиях геомагнитной активности

КУВШИНОВ А.А., ВАХНИНА В.В., СЕЛЕМИР В.Д., КАРЕЛИН В.И.

*Исследован механизм влияния геомагнитных возмущений на пропускную способность межсистемной электропередачи, в основе которого лежит вариация индуктивных сопротивлений намагничивания силовых трансформаторов квазипостоянными токами, изменяющихся с частотой 0,001–0,1 Гц и протекающих по заземленным обмоткам высокого напряжения в периоды геомагнитной активности. Предложена кусочно-линейная аппроксимация характеристики намагничивания для анализа одностороннего насыщения магнитной системы под воздействием квазипостоянных токов, параметры которой определяются паспортными данными силового трансформатора. Показано, что вариация индуктивного сопротивления намагничивания силовых трансформаторов в периоды геомагнитной активности имеет комбинированный характер и в зависимости от интенсивности квазипостоянных токов обладает признаками как амплитудной, так и широтной модуляции. Получены выражения для количественной оценки вариаций индуктивного сопротивления намагничивания под воздействием квазипостоянных токов. Доказано, что вариация индуктивного сопротивления намагничивания силовых трансформаторов вызывает вариации предела передаваемой мощности в сторону уменьшения по мере усиления геомагнитной активности. Определен предел передаваемой мощности межсистемной электропередачи с учетом индуктивностей намагничивания силовых трансформаторов. Показано, что предел передаваемой мощности «коротких» линий электропередачи под воздействием геомагнитных возмущений может снижаться на 35,6%, а «длинных» линий электропередачи – на 83,8%.*

**Ключевые слова:** линия электропередачи, силовой трансформатор, геомагнитные возмущения, квазипостоянные токи, предел передаваемой мощности

Геомагнитная активность характеризует степень возмущенности геомагнитного поля за определенный промежуток времени при взаимодействии солнечного ветра (потока плазмы, испускаемого Солнцем) с магнитосферой Земли. В качестве количественной меры такого взаимодействия используют индексы геомагнитной активности, которые характеризуют интенсивность геомагнитной возмущенности на локальной территории, на всей Земле, от конкретных источников, например авроральных электроджетов [1].

Для оценки возможного воздействия геомагнитных возмущений на технические системы наиболее часто используют планетарный индекс  $K_p$ , который характеризует возмущенность геомагнитного поля в трехчасовом интервале и выражается в баллах от 0 до 9. Вербально состояние геомагнитного поля в зависимости от значения индекса  $K_p$  характеризуется как спокойное ( $K_p < 2$ ), слабозвозмущенное ( $K_p \leq 2$ ;  $K_p = 2$ ; 3), возмущенное ( $K_p = 4$ ), магнитная буря ( $K_p = 5$ ; 6), сильная магнитная буря ( $K_p \geq 7$ ) [2].

Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA) в 2009 г. принята классификация параметров космической погоды и возможных воздействий на технические системы [2, 3], в том числе на электроэнергетические систе-

мы (ЭЭС). В таблице представлены критерии возмущенности геомагнитного поля и возможные инициируемые в ЭЭС эффекты по классификации «NOAA Space Weather».

Значение индекса $K_p$	Число геомагнитных возмущений	Возможное воздействие на ЭЭС
9	4	Возможны разрушения ЭЭС и повреждения трансформаторов
8	100	Возможны проблемы со стабильностью напряжения, частичные разрушения ЭЭС и отключение защитных систем
7	200	Необходима коррекция напряжения, ложные срабатывания релейной защиты, высокий "газ в масле" силовых трансформаторов
6	600	Воздействие на высокоширотные ЭЭС
5	1700	Слабые флуктуации в ЭЭС

Как видно, геомагнитные возмущения в зависимости от интенсивности способны оказать существенное влияние на режимы работы ЭЭС, вплоть до развития системных аварий и повреждения силовых трансформаторов. Это объясняется тем, что геомагнитные возмущения генерируют вторичные электрические токи в проводящих слоях литосферы Земли (теллурические токи), а на поверхности электрические потенциалы, обычно несколько вольт на километр [4, 5]. Между точками заземления нейтралей обмоток высокого напряжения (ВН) силовых трансформаторов возникает разность потенциалов, которая вызывает в протяженных линиях электропередачи (ЛЭП) с низким омическим сопротивлением фазных проводов протекание геоиндуцированных токов до десятков и сотен ампер.

Инструментальные измерения показывают, что частота изменения геоиндуцированных токов находится в диапазоне от 0,001 до 0,1 Гц [6, 7]. Поэтому в электрических сетях промышленной частоты геоиндуцированные токи протекают практически как постоянные токи, значение которых ограничивается только омическими сопротивлениями элементов пути протекания.

Из состава основного электрооборудования ЭЭС к воздействию квазипостоянных токов (КПТ) наиболее чувствительны силовые трансформаторы, магнитная система которых в периоды геомагнитных возмущений подвергается одностороннему насыщению, причем глубина насыщения существенно зависит от конструктивного исполнения магнитопровода. Экспериментально установлено, что при одинаковом значении КПТ порядка 20÷35 А максимальное значение тока намагничивания си-

лового трансформатора с бронестержневой конструкцией магнитопровода в 10 раз и более превышает максимальное значение тока намагничивания силового трансформатора со стержневой конструкцией магнитопровода [8]. При больших значениях КПТ указанная разность токов намагничивания только увеличивается. Это объясняется тем, что магнитный поток, создаваемый КПТ при протекании по заземленным обмоткам ВН, в первом случае практически не выходит за пределы магнитной системы, а во втором случае замыкается в немагнитной среде.

Следует добавить, что бронестержневая конструкция магнитной системы используется обычно в силовых трансформаторах с номинальной мощностью более 80÷100 МВА [9, 10]. Поэтому режимные параметры электропередач, на трансформаторных подстанциях которых установлены такие силовые трансформаторы также будут подвержены влиянию геомагнитных возмущений. Это, как правило, системообразующие электропередачи с номинальным напряжением 220 кВ и выше, основным режимным параметром которых является пропускная способность по условиям статической устойчивости. Изменения такого важного режимного параметра при вариациях КПТ могут служить одной из причин возникновения тех эффектов, которые отмечены в таблице. Таким образом, актуальной является задача определения пропускной способности электропередачи в условиях геомагнитной активности.

**Расчетная схема электропередачи.** На рис. 1 показаны схемы: принципиальная (а) и замещения (б) схемы межсистемной электропередачи, связывающей ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub> с напряжениями  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$  на

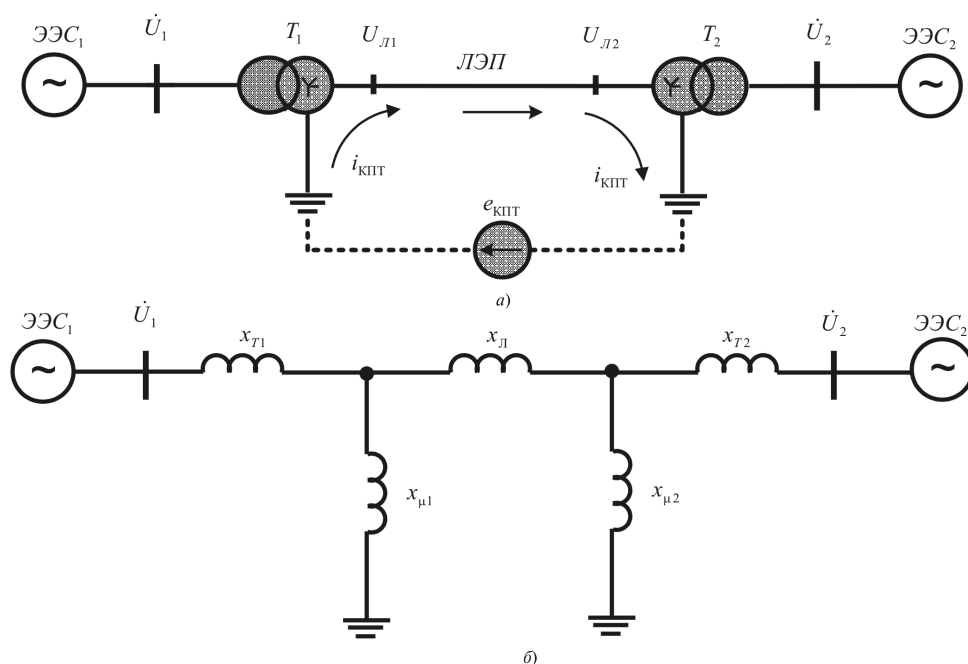


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) межсистемной электропередачи

шинах бесконечной мощности соответственно. Нейтрали обмоток высокого напряжения силовых трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  заземлены. Последнее обстоятельство обуславливает уязвимость рассматриваемой электропередачи к воздействию КПТ, которые, протекая по заземленным обмоткам ВН силовых трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ , вызывают одностороннее насыщение магнитных систем. В результате многократно возрастает проводимость ветви намагничивания силовых трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ , оказывая влияние на режимные параметры электропередачи.

Для получения более четкого представления о механизме влияния КПТ на пропускную способность рассматриваемой электропередачи потери мощности в фазных проводах ЛЭП и силовых трансформаторах  $T_1$ ,  $T_2$  не учитываются. Такое допущение при определении пропускной способности электропередач с номинальным напряжением 220 кВ и выше является достаточно распространенным. Предел передаваемой мощности по воздушной ЛЭП без потерь определяется в общем случае известным выражением:

$$P_M = \frac{U_{л1} U_{л2}}{z_B \sin(\alpha_0 l)},$$

где  $U_{л1}$ ,  $U_{л2}$  — напряжения в начале и в конце ЛЭП соответственно;  $z_B = \sqrt{x_0 / b_0}$  — волновое сопротивление ЛЭП;  $\alpha_0 = \sqrt{x_0 b_0}$  — коэффициент фазы;  $x_0$  — погонное индуктивное сопротивление;  $b_0$  — погонная емкостная проводимость;  $l$  — протяженность ЛЭП.

Значения коэффициента фазы для воздушных ЛЭП указанных выше классов напряжения лежат в узком диапазоне  $\alpha_0 = 0,06 \div 0,065$  град/км. Поэтому при длине ЛЭП менее 462÷500 км значение произведения  $\alpha_0 l$  не превысит 30 град, позволяя принять приближительное (с точностью до 6%) равенство  $\sin(\alpha_0 l) \approx \alpha_0 l$ . В этих условиях  $z_B \sin(\alpha_0 l) \approx x_0 l = x_{л}$ . Следует добавить, что средняя длина ЛЭП между соседними подстанциями составляет 100 км в электрических сетях 220 кВ и 280÷300 км в электрических сетях 500 и 750 кВ [11]. Таким образом, ограничение  $l \leq (462 \div 500)$  км позволяет учитывать только индуктивное сопротивление фазных проводов при рассмотрении пропускной способности широкого круга эксплуатируемых ЛЭП. Для более протяженных ЛЭП необходимо учитывать волновые параметры, что требует отдельного рассмотрения.

На рис. 1,б представлена схема замещения для качественного анализа механизма влияния КПТ на пропускную способность электропередачи, полученная с учетом оговоренных выше ограничений. В данной схеме ЛЭП учитывается только индуктивным сопротивлением  $x_{л}$  фазных проводов, а сило-

вые трансформаторы  $T_1$ ,  $T_2$  представлены упрощенной Г-образной схемой замещения, в которой продольную ветвь образует индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания ( $x_{T1}$ ,  $x_{T2}$ ), а поперечную ветвь — индуктивное сопротивление намагничивания ( $x_{\mu 1}$ ,  $x_{\mu 2}$ ). Следует добавить, что схема замещения рис. 1,б применима и в случае использования в электропередаче автотрансформаторов связи, которые также могут быть представлены упрощенной Г-образной схемой замещения при соответствующем определении параметров продольной и поперечной ветвей.

**Вариации параметров намагничивания силового трансформатора на периоде напряжения питания.** Геомагнитные возмущения вызывают вариации параметров намагничивания силового трансформатора, которые складываются из «быстрой» и «медленной» составляющих.

«Быстрая» составляющая представляет собой вариацию параметров намагничивания на периоде напряжения питания ( $T = 0,02$  с), которая обусловлена нелинейностью характеристики намагничивания, приобретающей ярко выраженный «вентильный» характер при одностороннем насыщении под воздействием КПТ. «Медленная» составляющая представляет собой вариацию параметров намагничивания на периоде изменения КПТ ( $T_{КПТ} = 10 \div 1000$  с). Соотношение периодов  $T_{КПТ} / T = (500 \div 50000)$  позволяет воспользоваться принципом разделения частот и анализировать каждую из указанных составляющих отдельно. Тогда при рассмотрении «быстрых» вариаций можно считать КПТ неизменными на периоде напряжения питания, а при рассмотрении «медленных» вариаций учитывать параметры ветви намагничивания, осредненные на периоде напряжения питания.

Процесс «быстрых» вариаций индуктивности ветви намагничивания силового трансформатора и формирования однополярного тока намагничивания поясняют графики рис. 2. Здесь представлена кусочно-линейная аппроксимация характеристики намагничивания силового трансформатора, которая построена в координатах «потокосцепление  $\Psi(t)$  — ток намагничивания  $i_{\mu}$ » и задана двумя значениями индуктивности намагничивания — ненасыщенным ( $L_{\mu}$  при  $i_{\mu} < I_s$ ) и насыщенным ( $L_{\mu(s)}$  при  $i_{\mu} \geq I_s$ ).

Координатами точки излома ( $\Psi_s, I_s$ ) кусочно-линейной аппроксимации характеристики намагничивания должны быть паспортное значение тока холостого хода ( $I_x$ ) силового трансформатора и амплитудное значение ( $\Psi_m$ ) потокосцепления при номинальном напряжении ( $I_s = I_x$ ,  $\Psi_s = \Psi_m$ ). В этом случае ненасыщенное значение  $L_{\mu}$  индуктивности намагничивания кусочно-линейной ап-

проксимации будет определяться известным выражением:

$$L_{\mu} = \frac{100}{I_X} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\omega S_{\text{НОМ}}}, \quad (1)$$

а насыщенное значение  $L_{\mu(s)}$  можно задать соотношением

$$L_{\mu(s)} \frac{L_{\mu}}{k_{(s)}}. \quad (2)$$

Здесь  $S_{\text{НОМ}}$ ,  $U_{\text{НОМ}}$  — номинальная мощность и номинальное линейное напряжение силового трансформатора;  $I_X$  — паспортное значение тока холостого хода, %;  $\omega$  — угловая частота напряжения питания;  $k_{(s)}$  — коэффициент нелинейности характеристики намагничивания силового трансформатора.

В первом приближении коэффициент нелинейности  $k_{(s)}$  можно определить как отношение значений относительной дифференциальной магнитной проницаемости электротехнической стали для области рабочего перемагничивания ( $B \leq 1,6 \div 1,65$  Тл) и области технического насыщения ( $B > 1,65 \div 1,7$  Тл). Для силовых трансформаторов мощностью более 100 МВА с магнитной системой из холоднокатаной электротехнической стали значения коэффи-

циента нелинейности характеристики намагничивания лежат в достаточно узком диапазоне  $k_{(s)} = 280 \div 330$ .

Кривая мгновенных значений потокосцепления  $\Psi(t)$  обмотки ВН поясняет (см. рис. 2) качественный характер процессов формирования практически однополярного тока намагничивания и вариаций индуктивности намагничивания на интервале периода напряжения питания при появлении постоянной составляющей потокосцепления  $\Psi_{\text{КПТ}}$ , создаваемой КПТ. В периоды геомагнитных возмущений мгновенное значение потокосцепления равно сумме двух составляющих:

$$\Psi(t) = \Psi_m \cos \omega t + \Psi_{\text{КПТ}}, \quad (3)$$

где  $\Psi_m = \frac{\sqrt{2}U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}\omega}$  — амплитудное значение гармонической составляющей потокосцепления, обусловленной синусоидальным напряжением питания.

Выражение (3) позволяет связать координаты точки излома кусочно-линейной аппроксимации характеристики намагничивания с моментом перехода магнитной системы в режим технического насыщения:

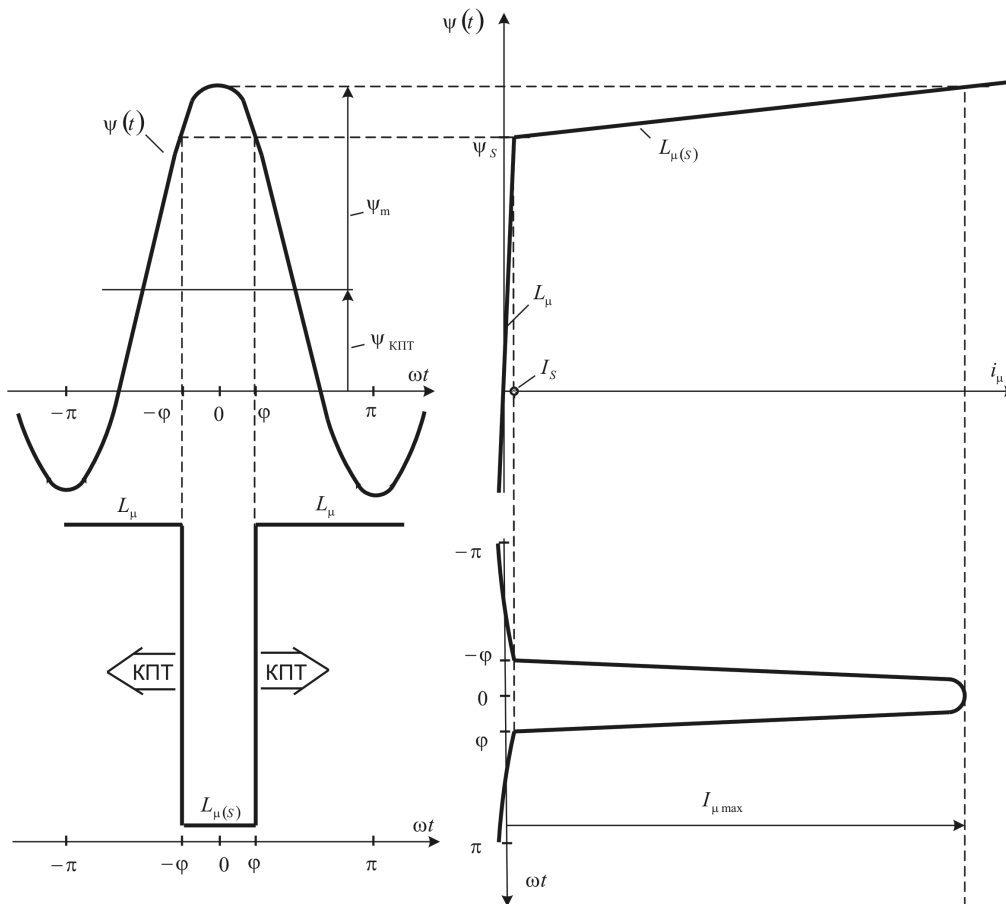


Рис. 2. Диаграммы вариаций характеристик намагничивания силового трансформатора под воздействием КПТ на периоде напряжения питания

$$\Psi_s = \Psi_m \cos \varphi + \Psi_{\text{КПТ}}; \quad I_s = I_{\text{КПТ}} + \frac{\Psi_m \cos \varphi}{L_\mu}, \quad (4)$$

где  $\varphi$  — фазовый угол насыщения магнитной системы силового трансформатора.

В области технического насыщения  $|\Psi(t)| \geq \Psi_s$  мгновенные значения тока намагничивания многократно возрастают и определяются, как видно из рис. 2, соотношением

$$\frac{\Psi(t) - \Psi_s}{i_\mu(t) - I_s} = L_{\mu(s)},$$

которое с учетом (3) позволяет записать:

$$i_\mu(t) = i_{\text{КПТ}} + \left( \frac{1}{L_\mu} = \frac{1}{L_{\mu(s)}} \right) \Psi_m \cos \varphi + \frac{\Psi_m \cos \omega t}{L_{\mu(s)}}. \quad (5)$$

Используя (1), (2) и (5), можно после ряда преобразований определить максимальное значение тока намагничивания (при  $\omega t = 0$ ):

$$I_{\mu \max} = i_{\text{КПТ}} k_{(s)} + \sqrt{2} I_x. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что максимальное значение тока намагничивания в условиях геомагнитных возмущений равно сумме двух составляющих, одна из которых определяется амплитудой паспортного значения тока холостого хода, а другая (доминирующая) — определяется значением КПТ, усиленным в  $k_{(s)}$  раз.

Значение индуктивности намагничивания в условиях геомагнитных возмущений и протекания КПТ по обмоткам ВН силового трансформатора также подвергается существенным изменениям. Как видно из рис. 2, значение индуктивности ветви намагничивания силового трансформатора изменяется от  $L_\mu$  до  $L_{\mu(s)}$  и обратно в моменты  $\omega t = \pm \varphi$  излома кусочно-линейной аппроксимации характеристики намагничивания. Соответственно, индуктивное сопротивление ветви намагничивания силового трансформатора под воздействием КПТ претерпевает на периоде напряжения питания изменения между значениями  $x_\mu = \omega L_\mu$  и  $x_{\mu(s)} = \omega L_{\mu(s)}$ .

При увеличении КПТ «ширина» области рабочего перемагничивания уменьшается, а при уменьшении КПТ — возвращается к прежним значениям. Таким образом, под воздействием КПТ происходит широтно-импульсная модуляция значения индуктивного сопротивления ветви намагничивания, среднее значение которого

$$x_{\mu \text{ср}} = x_\mu + \frac{\varphi}{\pi} (x_{\mu(s)} - x_\mu). \quad (7)$$

Как видно, при  $\varphi = 0$  (КПТ отсутствуют) имеет место равенство  $x_{\mu \text{ср}} = x_\mu$ , а при  $\varphi = \pi$  (интенсивные КПТ) — равенство  $x_{\mu \text{ср}} = x_{\mu(s)}$ .

**Вариации параметров намагничивания силового трансформатора на периоде геомагнитных возмущений.** На рис. 3 представлены графики, показывающие качественный характер влияния вариаций КПТ на параметры ветви намагничивания силового трансформатора. Графики построены в предположении гармонического изменения КПТ с частотой, принимающей значение из диапазона  $f_{\text{КПТ}} = (0,001 \div 0,1)$  Гц. Такая идеализация представляется полезной, поскольку полученные результаты можно обобщить на полигармонический характер изменения КПТ, а следовательно и на произвольные вариации КПТ.

С учетом принятого допущения в периоды геомагнитной активности между заземленными нейтральными возникает разность потенциалов

$$e_{\text{КПТ}} = E_{\text{КПТ}} \sin(2\pi f_{\text{КПТ}} t),$$

мгновенные значения которой изменяются по гармоническому закону с частотой  $f_{\text{КПТ}} = (0,001 \div 0,1)$  Гц. Поскольку  $f_{\text{КПТ}} \ll 50 f = \text{Гц}$ , то значение КПТ ограничивается только активными сопротивлениями:

$$\begin{aligned} i_{\text{КПТ}} &= \frac{e_{\text{КПТ}}}{R_\Sigma} = \frac{E_{\text{КПТ}}}{R_\Sigma} \sin(2\pi f_{\text{КПТ}} t) = \\ &= I_{\text{КПТ}} \sin(2\pi f_{\text{КПТ}} t), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $R_\Sigma$  — суммарное сопротивление контура протекания КПТ, которое должно учитывать активные сопротивления обмоток ВН, фазных проводов ЛЭП, а также сопротивления растекания заземляющих устройств силовых трансформаторов  $T_1, T_2$ .

На интервале каждого периода изменения КПТ происходит смещение режима перемагничивания магнитной системы силового трансформатора в область технического насыщения, которое сопровождается протеканием последовательности однополярных импульсов тока намагничивания, повторяющихся с частотой напряжения питания. Каждый из таких импульсов тока намагничивания описывается выражением (5), а число импульсов определяется соотношением  $(T_{\text{КПТ}} / 2T)$ . При изменении полярности КПТ одностороннее насыщение магнитной системы силового трансформатора сохранится. Изменится только направление насыщения, которое сопровождается изменением на противоположную полярности импульсов тока намагничивания. На рис. 3 ток намагничивания силового трансформатора показан в виде последовательности дискретных импульсов  $i_\mu(nT)$ , повторяющихся с периодом  $T$  и имеющих амплитуду, которая согласно (6) и (8) изменяется в соответствии с выражением

$$i_\mu(nT) = k_{(s)} I_{\text{КПТ}} \sin\left(2\pi \frac{n}{N}\right) + \sqrt{2} I_x, \quad (9)$$

где  $n=0,1,2,\dots,(N-1)$  — порядковый номер импульса тока намагничивания, отсчитываемый от момента изменения полярности КПТ;  $N=T_{\text{КПТ}}/T$  — кратность периодов изменения КПТ и напряжения питания.

Выражение (9) получено в предположении, что значение КПТ на  $n$ -м периоде напряжения питания остается неизменным и равным  $i_{\text{КПТ}}(nT)$ . При  $n=0$  и  $n=N/2$  амплитуда тока намагничивания равна амплитуде паспортного значения тока холостого хода силового трансформатора. При  $n=N/4$  и  $n=3N/4$  и соответственно  $i_{\text{КПТ}}(nT)=\pm I_{\text{КПТ}}$  ток намагничивания достигает максимального значения  $I_{\mu \max}(nT) \approx k_{(s)} I_{\text{КПТ}}$ . Таким образом, происходит амплитудная модуляция тока намагничивания с частотой изменения КПТ, причем модуль значений  $i_{\text{КПТ}}(nT)$  на интервале каждого периода напряжения питания усиливается в  $k_{(s)}$  раз.

Вариации индуктивного сопротивления ветви намагничивания силового трансформатора на периоде  $T_{\text{КПТ}}$  изменения КПТ описывает выражение, которое может быть получено из (7), если в качестве фазового угла насыщения учитывать значение  $\varphi(nT)$  на  $n$ -м периоде напряжения питания:

$$x_{\mu \text{ср}}(nT) = x_{\mu} + \frac{\varphi(nT)}{\pi} (x_{\mu(s)} - x_{\mu}), \quad (10)$$

где  $x_{\mu \text{ср}}(nT)$  — среднее значение индуктивного сопротивления намагничивания на  $n$ -м периоде напряжения.

Полагая, что номинальный режим перемагничивания магнитной системы силового трансформатора соответствует равенству  $\Psi_m = \Psi_s$ , и учитывая, что на участке рабочего перемагничивания значение потокоцепления, создаваемого КПТ, равно

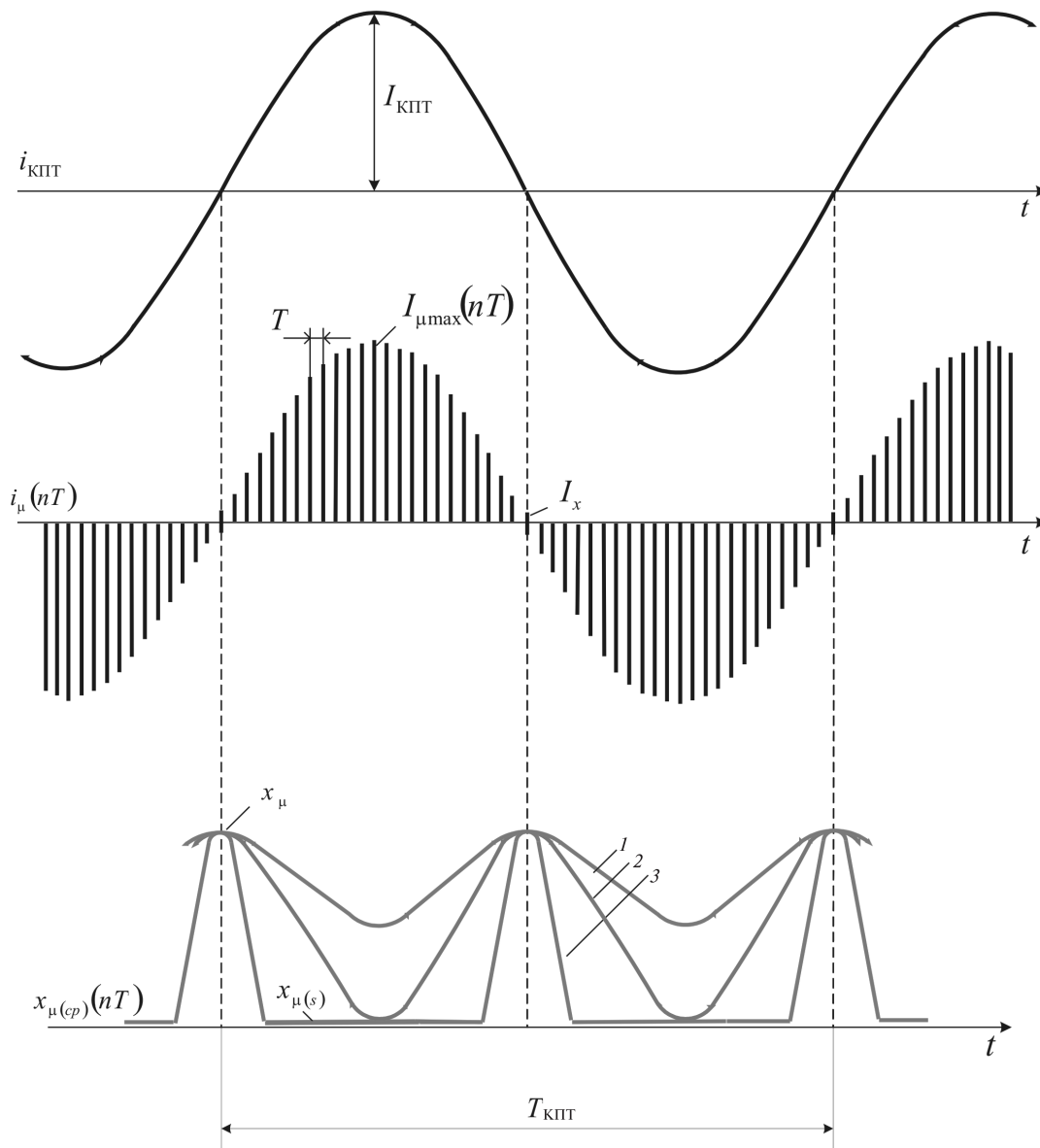


Рис. 3. Диаграммы вариаций характеристик намагничивания силового трансформатора на периоде изменения КПТ: 1 — при  $I_{\text{КПТ}} = \sqrt{2}I_x$ ; 2 —  $I_{\text{КПТ}} = 2\sqrt{2}I_x$ ; 3 — при  $I_{\text{КПТ}} = 4\sqrt{2}I_x$

$\Psi_{\text{КПТ}} = I_{\mu} i_{\text{КПТ}}$ , можно определить с помощью (4) текущее значение фазового угла насыщения:

$$\cos[\varphi(nT)] = \left( 1 - \frac{|i_{\text{КПТ}}(nT)|}{\sqrt{2}I_x} \right). \quad (11)$$

Выражения (8), (10) и (11) позволяют определить относительное значение индуктивного сопротивления намагничивания на  $n$ -м периоде напряжения питания с учетом интенсивности геомагнитных возмущений:

$$x_{\mu\text{ср}}^*(nT) = \frac{x_{\mu\text{ср}}(nT)}{x_{\mu}} = 1 - \frac{1 - k(s)^{-1}}{\pi} \times \arccos \left[ 1 - \frac{i_{\text{КПТ}}(nT)}{\sqrt{2}I_x} \sin \left( 2\pi \frac{n}{N} \right) \right]. \quad (12)$$

Анализ выражения (12) позволяет отметить критическое значение КПТ, равное  $I_{\text{кр}} = 2\sqrt{2}I_x$ , при котором значение индуктивного сопротивления намагничивания  $x_{\mu\text{ср}}(nT)$  снижается до минимально возможного значения  $x_{\mu(s)}$ . На рис. 3 представлены графики изменения  $x_{\mu\text{ср}}(nT)$ , построенные по (12) при различных значениях КПТ.

При  $I_{\text{КПТ}} < I_{\text{кр}}$  вариации КПТ вызывают амплитудную модуляцию индуктивного сопротивления намагничивания с динамическим диапазоном

$$D_x = (x_{\mu \text{ max}} / x'_{\mu \text{ min}}) < k(s).$$

Вариации индуктивного сопротивления ветви намагничивания происходит с удвоенной частотой изменения КПТ, т.е. с частотой  $2f_{\text{КПТ}}$ . Это объясняется тем, что и в области «положительного» насыщения, и в области «отрицательного» насыщения силовой трансформатор потребляет реактивную мощность, т.е. мощность, необходимую для создания магнитного потока.

При  $I_{\text{КПТ}} = I_{\text{кр}}$  динамический диапазон изменения индуктивного сопротивления намагничивания достигает максимального значения:

$$D_{x \text{ max}} = x_{\mu} / x_{\mu(s)} = k(s),$$

и амплитудная модуляция прекращается.

При  $I_{\text{КПТ}} > I_{\text{кр}}$  динамический диапазон изменения индуктивного сопротивления намагничивания остается на достигнутом уровне  $D_{x \text{ max}}$ . Однако увеличение КПТ будет сопровождаться увеличением количества периодов напряжения питания, в течение которых индуктивное сопротивление намагничивания находится на минимально возможном уровне  $x_{\mu(s)}$ , а режим перемагничивания магнитной системы силового трансформатора соответственно в области технического насыщения. Таким образом, с завершением амплитудной модуляции

при  $D_{x \text{ max}} = k(s)$  начинается широтная модуляция индуктивного сопротивления намагничивания, основным параметром которой можно считать количество периодов  $n_{\mu(s)}$  напряжения питания на интервале  $(T_{\text{КПТ}} / 2)$  вариаций КПТ, когда индуктивное сопротивление намагничивания принимает минимально возможное значение  $x_{\mu(s)}$ . Выражение (12) позволяет определить указанное число периодов:

$$n_{\mu(s)} = \frac{N}{2} - \frac{N}{2\pi} \arcsin \left( \frac{2\sqrt{2}I_x}{I_{\text{КПТ}}} \right). \quad (13)$$

Как видно из (13), при  $I_{\text{КПТ}} = 2\sqrt{2}I_x$  число периодов  $n_{\mu(s)} = 0$ , а при интенсивных геомагнитных возмущениях, когда  $I_{\text{КПТ}} \gg 2\sqrt{2}I_x$ , число периодов  $n_{\mu(s)} \rightarrow N/2$  и соответственно  $x_{\mu\text{ср}}(nT) \rightarrow x_{\mu(s)}$ .

**Вариации пропускной способности электропередачи.** Для определения пропускной способности электропередачи с учетом индуктивностей намагничивания силовых трансформаторов  $T_1, T_2$  необходимо расчетную схему, изображенную на рис. 1,б, преобразовать к более удобному виду (рис. 4).

Упрощенный и более удобный для количественных оценок вариант схемы замещения получен при преобразовании треугольника индуктивных сопротивлений  $x_{\mu 1} - x_{\mu 2} - x_{\mu}$  в эквивалентную звезду. Индуктивные сопротивления упрощенной схемы замещения определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} x_1(nT) &= x_{\tau 1} + \frac{x_{\mu} x_{\mu\text{ср}1}(nT)}{x_{\mu} + x_{\mu\text{ср}1}(nT) + x_{\mu\text{ср}2}(nT)}; \\ x_2(nT) &= x_{\tau 2} + \frac{x_{\mu} x_{\mu\text{ср}2}(nT)}{x_{\mu} + x_{\mu\text{ср}1}(nT) + x_{\mu\text{ср}2}(nT)}; \\ x_{\mu\text{ЭКВ}}(nT) &= \frac{x_{\mu\text{ср}1}(nT) x_{\mu\text{ср}2}(nT)}{x_{\mu} + x_{\mu\text{ср}1}(nT) + x_{\mu\text{ср}2}(nT)}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Выражения (14) записаны в предположении, что КПТ оказывают влияние только на индуктивные сопротивления намагничивания силовых трансформаторов  $T_1, T_2$ . В этом случае все индуктивные сопротивления упрощенной схемы замеще-

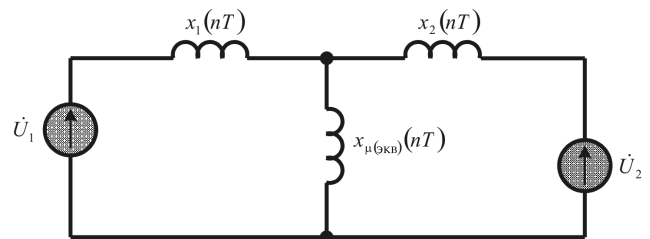


Рис. 4. Упрощенная схема замещения межсистемной электропередачи

ния электропередачи, как видно из (14), зависят от значения КПТ. Режим передачи активной мощности по ЛЭП также будет зависеть от значения КПТ:

$$P(nT) = \frac{U_1 U_2}{Z_{12}(nT)} \sin \delta = P_M(nT) \sin \delta, \quad (15)$$

поскольку значение взаимного сопротивления подвергается вариациям под воздействием геомагнитных возмущений:

$$Z_{12}(nT) = x_1(nT) + x_2(nT) + \frac{x_1(nT)x_2(nT)}{x_{\mu\text{ЭКВ}}(nT)}, \quad (16)$$

где  $\delta$  — угол нагрузки, равный углу между векторами напряжений  $U_1$  и  $U_2$  на шинах ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub>;  $Z_{12}(nT)$  — взаимное сопротивление ветвей ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub> на  $n$ -м периоде напряжения питания;  $P_M(nT)$  — предел передаваемой мощности на  $n$ -м периоде напряжения питания.

Как видно из выражений (15) и (16), в условиях геомагнитных возмущений поддержания неизменными режимных параметров  $U_1 = \text{const}$ ,  $U_2 = \text{const}$  недостаточно для сохранения неизменным режима передачи активной мощности. Для количественной оценки динамического диапазона амплитудной модуляции режима передачи активной мощности предварительно целесообразно с использованием выражений (14), (16) записать в развернутом виде выражение для относительной величины взаимного сопротивления

$$Z_{12}^*(nT) = \frac{Z_{12}(nT)}{Z_{12}} = 1 + \frac{x_{T1}}{x_{\mu\text{ср1}}(nT)} \frac{x_{T2}}{x_{\mu\text{ср2}}(nT)} \gamma_T + \left[ \frac{x_{T1}}{x_{\mu\text{ср1}}(nT)} \left( 1 + \frac{x_{T2}}{x_L} \right) + \frac{x_{T2}}{x_{\mu\text{ср2}}(nT)} \left( 1 + \frac{x_{T1}}{x_L} \right) \right] \gamma_T, \quad (17)$$

где  $Z_{12} = (x_{T1} + x_{T2} + x_L)$  — значение взаимного сопротивления при отсутствии геомагнитных возмущений и соответственно  $i_{\text{КПТ}}(nT) = 0$ ;  $\gamma_T = [1 + (x_{T1} + x_{T2}) / x_L]^{-1}$  — коэффициент влияния протяженности ЛЭП.

В (17) для индуктивных сопротивлений намагничивания следует использовать значения (12), записанные в компактной форме:

$$x_{\mu\text{ср1}}(nT) = x_{\mu1} x_{\mu\text{ср1}}^*(nT);$$

$$x_{\mu\text{ср2}}(nT) = x_{\mu2} x_{\mu\text{ср2}}^*(nT),$$

и обратить внимание на постоянство следующих отношений:

$$\frac{x_{T1}}{x_{\mu1}} = \frac{u_{K1}}{100} \frac{I_{X1}}{100} = C_1; \quad \frac{x_{T2}}{x_{\mu2}} = \frac{u_{K2}}{100} \frac{I_{X2}}{100} = C_2,$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  — конструктивно-технологические константы силовых трансформаторов  $T_1$ ,  $T_2$ ;  $u_{K1}$ ,

$u_{K2}$  — напряжения короткого замыкания силовых трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  %;  $I_{X1}$ ,  $I_{X2}$  — паспортные значения токов холостого хода, %.

Для широкой номенклатуры силовых трансформаторов с номинальной мощностью более 63 МВА и номинальным напряжением (110÷500) кВ диапазон значений конструктивно-технологической константы  $C$  составляет  $(3,85 \div 10,8) \cdot 10^{-4}$ . Тогда, полагая, что параметры силовых трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  имеют близкие значения:

$$C_1 \approx C_2 = C; \quad x_{T1} \approx x_{T2} = x_T; \quad x_{\mu1} \approx x_{\mu2} = x_{\mu};$$

$$x_{\mu\text{ср1}}(nT) \approx x_{\mu\text{ср2}}(nT) = x_{\mu\text{ср}}(nT),$$

выражение (17) можно существенно упростить:

$$Z_{12}^*(nT) = 1 + \left[ \frac{C}{x_{\mu\text{ср}}^*(nT)} \right]^2 + 2\gamma_T \left( 1 + \frac{x_T}{x_L} \right) \left[ \frac{C}{x_{\mu\text{ср}}^*(nT)} \right]. \quad (18)$$

Полагая, что под воздействием КПТ изменяется только взаимное сопротивление, а режимные параметры неизменны ( $U_1 = \text{const}$ ,  $U_2 = \text{const}$ ), степень влияния геомагнитных возмущений на режим передачи активной мощности целесообразно оценивать по относительному значению предела передаваемой мощности:

$$P_M^*(nT) = \frac{P_M(nT)}{P_M} = \frac{Z_{12}}{Z_{12}(nT)} = \frac{1}{Z_{12}^*(nT)}, \quad (19)$$

где  $P_M$  — предел передаваемой мощности при отсутствии геомагнитных возмущений.

На рис. 5 показана логическая схема, наглядно демонстрирующая механизм развития процесса нарушения статической устойчивости под воздействием КПТ.

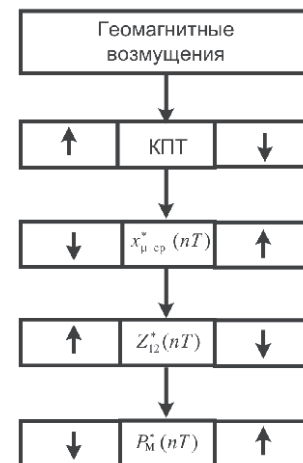


Рис. 5. Логическая схема механизма нарушения статической устойчивости электропередачи под воздействием КПТ (↑ — увеличение; ↓ — уменьшение)



**Пример.** Оценка теоретически возможного диапазона вариаций пропускной способности. В зависимости от соотношения между индуктивными сопротивлениями  $x_T$  и  $x_L$  возможны две предельные ситуации:

передача активной мощности осуществляется по «короткой» ЛЭП, когда  $x_T \gg x_L$  и следовательно отношение  $x_T / x_L \rightarrow \infty$ , а коэффициент влияния принимает значение  $\gamma_T \approx 0$ ;

передача активной мощности осуществляется по «длинной» ЛЭП, когда  $x_T \ll x_L$  и следовательно отношение  $x_T / x_L \rightarrow 0$ , а коэффициент влияния  $\gamma_T \approx 1,0$ .

Тогда при «короткой» ЛЭП значение взаимного сопротивления будет определяться соотношением

$$Z_{12}^{*(0)}(nT) = 1 + 2C \frac{(1 + x_T / x_L)}{(1 + 2x_T / x_L)} \frac{1}{x_{\mu\text{cp}}^*(nT)},$$

которое после раскрытия неопределенности « $\infty / \infty$ » примет вид:

$$Z_{12}^{*(0)}(nT) = \left[ 1 + \frac{C}{x_{\mu\text{cp}}^*(nT)} \right], \quad (20)$$

а при «длинной» ЛЭП

$$Z_{12}^{*(1)}(nT) = \left[ 1 + \frac{C}{x_{\mu\text{cp}}^*(nT)} \right]^2. \quad (21)$$

При всех промежуточных значениях отношения  $0 < (x_T / x_L) < \infty$ , когда  $0 < \gamma_T < 1$ , значение взаимного сопротивления будет в области значений:

$$Z_{12}^{*(0)}(nT) \leq Z_{12}^*(nT) \leq Z_{12}^{*(1)}(nT). \quad (22)$$

Выражение (19) совместно с (20), (21) и (12) позволяет оценить динамический диапазон изменения предела передаваемой мощности  $D_P$  под воздействием геомагнитных возмущений. Для этого достаточно, используя (12), определить относительное значение индуктивного сопротивления намагничивания при  $n=0$ , когда  $i_{\text{КПТ}}(nT)=0$ , и при  $n=N/4$ , когда  $i_{\text{КПТ}}(nT)=I_{\text{КПТ}}$  (см. рис. 3). Как показано ранее, уже при критическом значении КПТ ( $I_{\text{кр}} = 2\sqrt{2}I_x$ ) динамический диапазон изменения индуктивного сопротивления намагничивания достигает максимального значения  $D_{x\text{max}} = k_{(s)}$ . В этом случае динамический диапазон изменения предела передаваемой мощности «короткой» ЛЭП будет определяться выражением

$$D_P^{(0)} = \frac{P_M^{*(0)}(0)}{P_M^{*(0)}(N/4)} = \frac{1 + C/x_{\mu\text{cp}}^*(N/4)}{1 + C/x_{\mu\text{cp}}^*(0)}$$

$$= \frac{(1 + Ck_{(s)})}{(1 + C)}, \quad (23)$$

а «длинной» ЛЭП

$$D_P^{(1)} = \frac{P_M^{*(1)}(0)}{P_M^{*(1)}(N/4)} = \left[ \frac{1 + Ck_{(s)}}{(1 + C)} \right]^2. \quad (24)$$

Численные значения динамического диапазона изменения предела передаваемой мощности при  $C = (3,85 \div 10,08) \cdot 10^{-4}$  и  $k_{(s)} = (280 \div 330)$ , рассчитанные по (23) и (24), равны:  $D_P^{(0)} = (1,107 \div 1,356)$  и  $D_P^{(1)} = (1,225 \div 1,838)$ .

На рис. 6 показан качественный характер изменения угловой характеристики мощности ЛЭП под воздействием КПТ с динамическим диапазоном изменения предела передаваемой мощности  $D_P = 1,684$ .

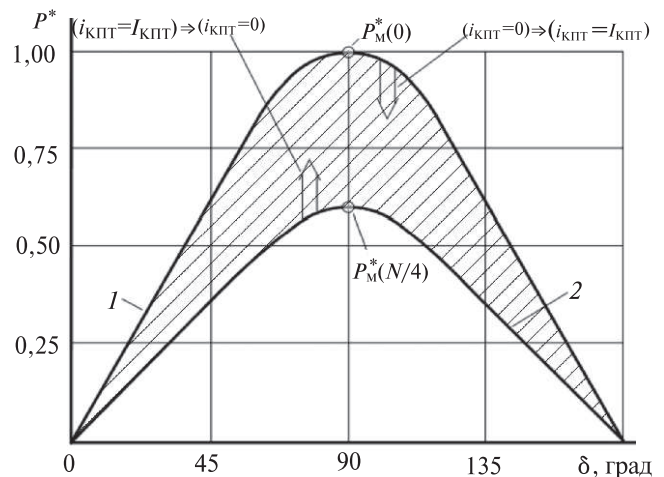


Рис. 6. Вариации угловой характеристики мощности под воздействием КПТ

На интервале  $(0 \div T_{\text{КПТ}} / 4)$  угловая характеристика мощности смещается «вниз» из положения 1 в положение 2, а на интервале  $(T_{\text{КПТ}} / 4) \div (T_{\text{КПТ}} / 2)$  угловая характеристика мощности возвращается в исходное положение 1. Аналогичные изменения угловой характеристики мощности будут происходить и на интервале второго полупериода  $(T_{\text{КПТ}} / 2) \div T_{\text{КПТ}}$ . Таким образом, вариации угловой характеристики мощности под воздействием КПТ будут происходить с частотой  $2f_{\text{КПТ}}$ .

Область сохранения статической устойчивости режима передачи неизменной активной мощности  $P = \text{const}$  в условиях геомагнитных возмущений будет определяться неравенством  $P^* < P_M^*(N/4)$ . Область возможных нарушений статической устойчивости (на рис. 6 отмечена штриховкой) режима передачи активной мощности под воздействием геомагнитных возмущений определяется неравенством

$P_M^*(0) \leq P^* \leq P_M^*(N/4)$ . При невозможности выполнения данного условия для поддержания синхронной связи между ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub> в условиях геомагнитных возмущений необходимо разгрузить ЛЭП таким образом, чтобы режим передачи активной мощности вернулся в область статической устойчивости, либо предпринять технические мероприятия для ограничения или полного блокирования КПП [12].

Следует добавить, что меньшим значениям конструктивно-технологической константы силовых трансформаторов соответствуют и меньшие значения динамических диапазонов  $D_P^{(0)}$  и  $D_P^{(1)}$  изменения пределов передаваемой мощности. Таким образом, чем меньше паспортные значения напряжения короткого замыкания и тока холостого хода, а соответственно выше конструктивно-технологический уровень силовых трансформаторов, тем меньше влияние геомагнитных возмущений на режим передачи активной мощности по ЛЭП. При этом для «коротких» ЛЭП снижение предела передаваемой мощности может составить от 10,7 до 35,6%, а для «длинных» ЛЭП при равной интенсивности геомагнитных возмущений практически в 2 раза больше — от 22,5 до 83,8%.

**Выводы.** 1. Режим передачи активной мощности по межсистемной линии электропередачи с двухсторонним питанием от трансформаторных подстанций, на которых установлены силовые трансформаторы с бронестержневой конструкцией магнитной системы, в условиях геомагнитных возмущений, вызывающих протекание квазипостоянных токов по фазным проводам и заземленным обмоткам высокого напряжения, должен определяться с учетом индуктивностей намагничивания силовых трансформаторов.

2. Под воздействием квазипостоянных токов происходит уменьшение индуктивного сопротивления намагничивания силовых трансформаторов электропередачи в результате широтно-импульсной модуляции на периоде напряжения питания и амплитудной модуляции на периоде вариаций геомагнитных возмущений. При значениях квазипостоянных токов, превышающих в  $2\sqrt{2}$  раза паспортное значение тока холостого хода силового трансформатора, индуктивное сопротивление намагничивания уменьшается в  $k_{(s)} \approx (280 \div 330)$  раз до минимально возможного значения. Дальнейшее возрастание квазипостоянных токов приводит к увеличению числа периодов напряжения питания в пределах интервала вариаций геомагнитных возмущений, на которых режим перемагничивания магнитной системы силовых трансформаторов полностью смещается в область технического насыщения.

3. Уменьшение индуктивного сопротивления намагничивания силовых трансформаторов под воздействием квазипостоянных токов вызывает уменьшение предела передаваемой мощности электропередачи. Для «коротких» электропередач, у которых индуктивное сопротивление линии во много раз меньше индуктивного сопротивления короткого замыкания силового трансформатора, возможно снижение предела передаваемой мощности на (10,7 ÷ 35,6)%. Для «длинных» электропередач, у которых индуктивное сопротивление линии многократно превышает индуктивное сопротивление короткого замыкания силового трансформатора, возможно снижение предела передаваемой мощности на (22,5 ÷ 83,8)%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Заболотная Н.А.** Индексы геомагнитной активности. Изд. 2-е, перераб. — М.: Изд-во ЛКИ, 2007, 88 с.
2. **Messerotti M.** The NOAA Space Weather Scale tables. — COST Action 724, Athens, 11 October, 2005, pp.1—4.
3. **Тертышников А.В.** Возможные коррективы опасных гелиогеофизических явлений. — Гелиогеофизические исследования, 2013, вып. 5, с. 34—42.
4. **Kappenman J.G., Albertson V.D.** Bracing for the Geomagnetic Storm. — IEEE Spectrum, 1990, 28, No. 3, pp. 27—33.
5. **Boteller D.H.** Effects of geomagnetically induced current in B. C. Hydro 500 kV-System. — IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4, No. 1, pp. 818—823.
6. **Pirjola R., Viljanen A., Amm O., Pulkkinen A.** Power and pipelines (ground systems). — Finnish Meteorological Institute, Geophysical Research Division P. O. Box 503, FIN-00101 Helsinki, Finland.
7. **Селиванов В.Н., Данилин А.Н., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Баранник М.Б.** Результаты длительных регистраций токов в нейтралах силовых трансформаторов. — Труды Кольского научного центра РАН «Энергетика», 2010(1), №1, вып. 1, с. 84—90.
8. **Nobuo T., Tetsuo O., Fumihiko M., Sadamu S., Yasuo F.** An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents. — IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, vol. 9, No. 2, pp. 1173—1179.
9. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов, 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986, 528 с.
10. **Лизунов С.Д., Лоханин А.К.** Силовые трансформаторы. Справочная книга. — М.: Энергоиздат, 2004, 616 с.
11. **Герасименко А.А., Федин В.Т.** Передача и распределение электрической энергии. Изд. 2-е. — Ростов н/Д: Феникс, 2008, 715 с.
12. **Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н., Зюзин М.О.** Сравнительный анализ способов защиты силовых трансформаторов систем электроснабжения от воздействия геоиндуцированных токов. — Промышленная энергетика, 2014, № 8, с. 30—35.

[04.04.2016]

*А в т о р ы : Кувшинов Алексей Алексеевич окончил электротехнический факультет Тольяттинского политехнического института (ТПИ) в 1975 г. В 2004 г. в Ульяновском государственном техническом университете защитил докторскую диссертацию «Логико-алгебраическое моделирование и синтез интеллектуальных систем электропитания электронных и вычислительных средств в элементном базисе универсальных и силовых регуляторов». Профессор ка-*

федры «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета (ТГУ).

**Вахнина Вера Васильевна** окончила ТПИ в 1983 г. В 2013 г. в Национальном исследовательском университете «МЭИ» защитила докторскую диссертацию «Разработка основ теории функционирования систем электроснабжения потребителей при воздействии геоиндуцированных токов». Профессор, заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехника» ТГУ.

**Селемир Виктор Дмитриевич** окончил в 1972 г. Харьковский государственный университет им. А.М. Горького. В 2002 г. защитил докторскую диссертацию. Профессор кафедры «Электрофизика» ТГУ.

**Карелин Владимир Иванович** окончил в 1971 г. Ленинградский институт точной механики и оптики. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию. Профессор кафедры «Электрофизика» ТГУ.

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 9, pp. 4–14.*

## The capacity of power transmitting capacity during the periods of geomagnetic activity

**KUVSHINOV Aleksei Alekseyevich** (Togliatti State University (TSU), Togliatti, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**VAKHNINA Vera Vasil'yevna** (TSU, Togliatti, Russia) – Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

**SELEMIR Viktor Dmitriyevich** (TSU, Togliatti, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**KARELIN Vladimir Ivanovich** (TSU, Togliatti, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

*Was analyzed the effect of the geomagnetic disturbances on interconnection power transmitting capacity. It is based on the variation of the inductive resistances of power transformer magnetizing by quasi-direct currents which are varying with frequency 0,001–0,1 Hz and flowing through the high-voltage grounded winding during the periods of geomagnetic activity. It is given a piecewise linear approximation of the magnetizing characteristic to analyze the unilateral saturation of the magnetic system under the influence of quasi-direct currents, which parameters are determined by the passport data of the power transformer. It is shown that the variation of the inductive resistance of magnetizing of power transformer during geomagnetic activity has a combined character and in addition of intensity of quasi-direct currents could be characterized as the amplitude and width modulation. Were get the expressions for quantifying the variation of the inductive resistance of the magnetization under the influence of quasi-direct currents. It is proved that the variation of the inductive resistance of the magnetizing power transformers caused the decreasing the limit of the variation of the transmitted power with the increasing of geomagnetic activity. It is defined the limit of interconnection power transmitting capacity taking into account the magnetizing inductance of the power transformers. The limit of transmitting capacity of «short» power lines under the influence of geomagnetic disturbances can be reduced by 35,6%, and «long» transmission lines – by 83,8%.*

**Key words:** power line, power transformer, geomagnetic disturbance, quasi-direct current, the limit of transmitting capacity

### REFERENCES

- Zabolotnaya N.A.** *Indeksy geomagnitnoi aktivnosti. Izd. 2-ye* (Indices of geomagnetic activity. 2nd edit.). Moscow, Publ. LKI, 2007, 88 p.
- Messerotti M.** The NOAA Space Weather Scale tables. – COST Action 724, Athens, 11 October, 2005, pp.1–4.
- Tertyshnikov A.V.** *Geliyofizicheskiye issledovaniya – in Russ. (Heliophysical Explorations)*, 2013, iss. 5, pp. 34–42.
- Kapenman J.G., Albertson V.D.** Bracing for the Geomagnetic Storm. – IEEE Spectrum, 1990, 28, No. 3, pp. 27–33.
- Boteller D.H.** Effects of geomagnetically induced current in B. C. Hydro 500 kV-System. – IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4, No. 1, pp. 818–823.
- Pirjola R., Viljanen A., Amm O., Pulkkinen A.** Power and pipelines (ground systems). – Finnish Meteorological Institute, Geophysical Research Division P. O. Box 503, FIN-00101 Helsinki, Finland.
- Selivanov V.N., Danilin A.N., Kolobov V.V., Sakharov Ya.A., Barannik M.B.** *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN «Energetika»* – in Russ. (*Proc. of the Kola Scientific Centre of the Academy of Sciences «Energy»*), 2010, No. 1, iss. 1, pp. 84–90.
- Nobuo T., Tetsuo O., Fumihiko M., Sadamu S., Yasuo F.** An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents. – IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, vol. 9, No. 2, pp. 1173–1179.
- Tikhomirov P.M.** *Raschet transformatorov. 5-ye izd.* (Calculation of transformers. 5th edit.). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1986, 528 p.
- Lizunov S.D., Lokhanin A.K.** *Silovye transformatory. Spravochnaya kniga* (Power transformers. Reference book). Moscow, Publ. Energoizdat, 2004, 616 p.
- Gerasimenko A.A., Fedin V.T.** *Peredacha i raspredeleniye elektricheskoi energii. 2-ye izd.* (Transmission and distribution of electric energy. 2nd edit.). Rostov-on-Don, Publ. «Phoenix», 2008, 715 p.
- Kuvshinov A.A., Vakhnina V.V., Chernenko A.N., Zyuzin M.O.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2014, No. 8, pp. 30–35.