



Лесных Елена Владимировна родилась в 1975 г. В 1996 г. окончила Новосибирскую государственную академию водного транспорта по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов». В 1999 г. — аспирантуру Новосибирского государственного технического университета по специальности 05.09.01 «Электромеханика». С 2000 г. — кандидат технических наук. На кафедре «Электротехника, диагностика и сертификация» СГУПС работает с ноября 2000 г. Ученое звание доцента по кафедре присуждено решением Министерства образования РФ от 19 мая 2004 г.

В 2002 г. прошла обучение и была сертифицирована на второй уровень по магнитным методам неразрушающего контроля объектов железнодорожного транспорта.

УДК 621.3.019.3

Е.В. ЛЕСНЫХ

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Предлагается использовать для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог четырехфазные линии электропередач. Рассмотрены несколько способов симметрирования напряжений и даны технические характеристики схем симметрирования напряжений на нагрузке при разных способах включения четырехфазных электропередач.

Вопросам качества и надежности электрической энергии в последние несколько лет уделяется очень большое внимание, а проблема повышения надежности электроснабжения практически для всех потребителей электроэнергетики является актуальнейшей. Железнодорожный транспорт — один из крупных потребителей электрической энергии. Наряду с нагрузками электрической тяги и заводов по ремонту локомотивов, вагонов, значительную долю в электропотреблении составляют нагрузки нетяговых потребителей. Наиболее крупные нетяговые потребители сосредоточены на сортировочных и участковых станциях и на железнодорожных узлах. Электроснабжение этих потребителей выполняется, как правило, с использованием схем, принятых для электроснабжения промышленных предприятий и объектов жилищно-коммунального хозяйства. Часть нетяговых потребителей (нагрузки СЦБ, связи и др.) относятся к первой категории по обеспечению надежности электроснабжения. Для электроснабжения этой группы потребителей применяется система продольного электроснабжения, имеющая ряд специфических особенностей для железных дорог, обусловленных электрификацией на постоянном или переменном токе, и дорог с тепловозной тягой. Для потребителей промежуточных станций, остановочных пунктов, перегонов характерны большая рассредоточенность и сравнительно малые нагрузки. Повсеместно электроснабжение таких потребителей осуществляется одноцепными линиями. При большом количестве маломощных потребителей линии электропередач перегружены, потери напряжения в конце линии достигают 20 % и более.

Четырехфазная линия электропередачи является компромиссным решением проблемы электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог. С одной стороны, она дешевле двухцепной примерно в 1,6–1,8 раза, что позволяет рассматривать ее экономические показатели в сравнении с аналогичными показателями одноцепной линии, с другой стороны, обладая надежностью

двухцепной линии электропередачи, имеет примерно в 1,5–1,7 раза меньшие потери мощности. Для ее осуществления не требуется разработка нового оборудования.

По существу, четырехфазная электропередача является удвоенной линией «два провода — земля» (ДПЗ). Напряжения и токи в одной ДПЗ соответственно равны по величине и противоположны по направлению напряжениям и токам в другой ДПЗ. Схема простейшей четырехфазной электропередачи изображена на рис. 1.

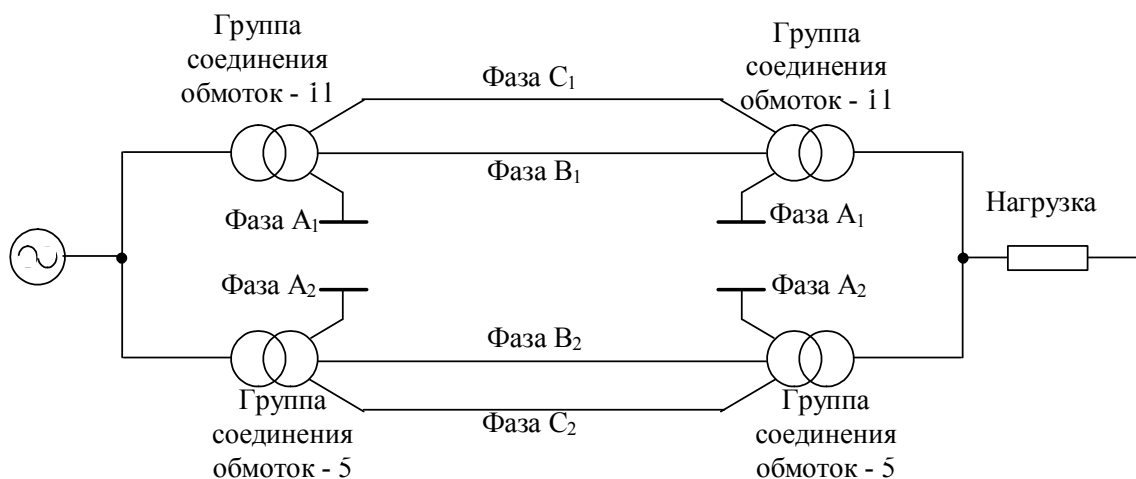


Рис. 1. Схема простейшей четырехфазной электропередачи

Подвеска проводов разных двухфазных цепей на расстоянии, не создающем их опасное сближение, исключает трехфазные и четырехфазные короткие замыкания (КЗ), т.е. в результате КЗ возможно отключение только одной двухфазной цепи четырехфазной линии. Если при повреждении одной цепи заземлить одну фазу линии этой цепи, в большинстве случаев обеспечивается передача половины предельной мощности четырехфазной линии. Это означает, что жизнеобеспечивающие объекты населенных пунктов останутся в работе.

В железнодорожном электроснабжении повсеместно в тяговых сетях используется система «два провода — рельс», являющаяся вариантом ДПЗ.

Четырехфазные линии электропередачи предполагают питание каждой нагрузки через два трансформатора. При питании через один трансформатор появляются токи в земле. Нежелательность этих токов обусловлена двумя последствиями:

- создается контур «провод — земля», протекание токов по которому наводит напряжения на линии связи, железнодорожной автоматики;
- высыхивается земля вокруг заземлителей, в результате чего возникают большие шаговые напряжения.

В трехфазной сети через два трансформатора запитываются потребители только первой и второй категорий. В состав нетяговых потребителей входят также потребители третьей категории, которые традиционно питаются от одного трансформатора. Установка дополнительных трансформаторов для питания потребителей третьей категории удорожает схему.

Поэтому аналогично системе «два провода — рельс» предлагается выполнить четырехфазную линию с использованием рельса в качестве общего третьего провода для каждой полупеи. По рельсу на каждом участке между двумя потребителями будет протекать разность токов потребителей, подключенных к разным полупеям. При одинаковых нагрузках эта разность всегда будет меньше тока в системе «два провода — рельс».

Схема четырехфазной линии с использованием рельса в качестве общего третьего провода изображена на рис. 2.

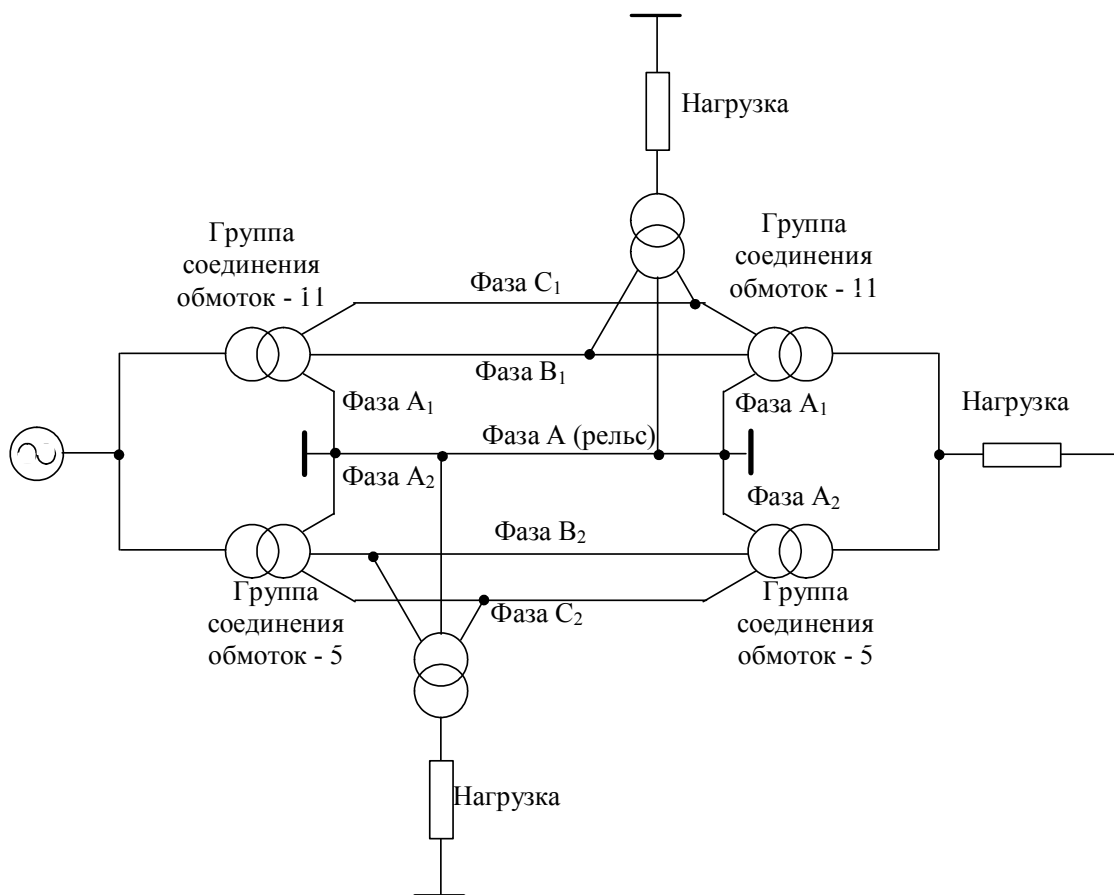


Рис. 2. Схема четырехфазной линии по системе «четыре провода — рельс» (ЧПР)

Совокупность четырехфазных линий электропередачи, трансформаторных подстанций образуют принципиально новую электрическую систему — четырехфазные электрические сети. Связь четырехфазных электрических сетей с традиционными трехфазными как со стороны питания, так и со стороны потребителей осуществляется обычными трехфазными трансформаторами.

Технические характеристики четырехфазной линии электропередачи рассмотрим в сравнении с двухцепной и одноцепной трехфазными напряжением 35 кВ. Длину линий примем равной 100 км, провод — АС-95. Такие линии на Севере не считаются слишком длинными. Нагрузка включена на напряжение 10 кВ через трансформаторы мощностью 10 МВА. Ограничивающим фактором является допустимое напряжение, равное $1,15 U_H$.

Максимальная передаваемая мощность по двухцепной трехфазной линии, ограничиваемая уровнем напряжения 40,5 кВ, равна 11,4 МВт с $\cos \varphi 0,8$ и

компенсацией реактивной мощности 2 МВАр. Потери мощности в линии составляют при этом 3,44 МВт, или 30,17 % от мощности нагрузки.

Так как в четырехфазной линии загружены только две фазы, а сопротивление третьей равно нулю, то на нагрузке создаются неодинаковые фазные падения напряжения. Чем больше передаваемая мощность, тем больше несимметрия напряжений. Несимметрия напряжений оценивалась по относительной величине напряжения обратной последовательности на шинах нагрузки. Зависимость несимметрии напряжения от передаваемой мощности приведена на рис. 3.

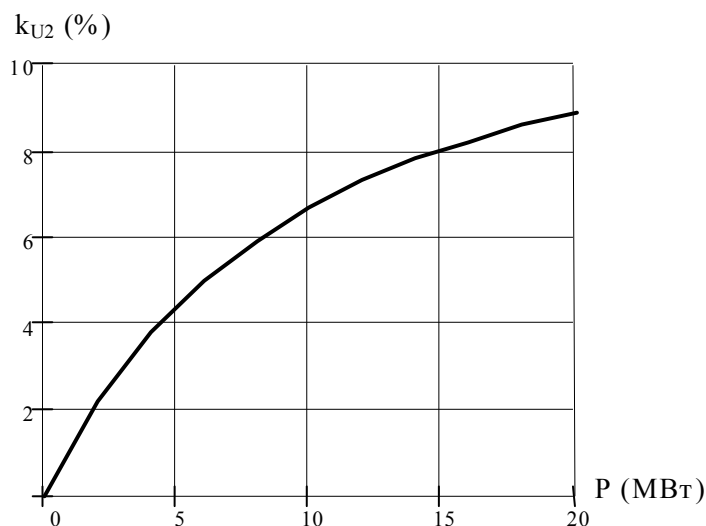


Рис. 3. Зависимость несимметрии напряжения от передаваемой мощности

При всех передаваемых мощностях соотношение линейных напряжений имеет одинаковый характер. Так, при заземленной фазе A и группе соединения обмоток трансформаторов одиннадцатой и пятой наименьшее напряжение на стороне низкого напряжения U_{AB} , наибольшее U_{CA} . Рассмотрим несколько способов симметрирования напряжений.

Симметрирование режима поперечными емкостями

Наиболее простым является включение емкостных батарей между фазами с наименьшим линейным напряжением. Полного симметрирования при этом не достигается. Критерием допустимости режима является относительная величина несимметрии напряжений, не превышающая 2 %. Расчеты показывают, что в диапазоне $\cos\varphi$ от 0,7 до 0,95 каждый передаваемый нагрузке мегавольт-ампер мощности требует для компенсации несимметрии напряжений примерно 0,59 МВАр конденсаторных батарей.

Симметрирование режима продольно-поперечным регулированием напряжения

Второй способ снижения несимметрии напряжения связан с пофазным регулированием коэффициентов трансформации трансформаторов. На рис. 4, *a* изображена векторная диаграмма двух фазных напряжений на линии: U_B и U_C , которые соответствуют линейным напряжениям линии U_{BA} и U_{CA} , при передаваемой мощности 16 МВт. Угол между напряжениями $52,2^\circ$, и напряжение фазы B больше напряжения фазы C . Отсутствие напряжений обратной последовательности в системе двух векторов имеет место, если эти векторы равны, а угол между

ними составляет 60° . Симметризовать систему векторов, изображенных на рис. 4, а, можно, если их общую точку сдвинуть влево по оси действительных чисел и вверх по оси мнимых. Физически это можно осуществить продольно-поперечным регулированием напряжения заземленной обмотки трансформатора (в рассматриваемых примерах — фазы А). То есть на фазе А должен быть комплексный коэффициент трансформации. В этом случае несимметрия напряжений полностью не исключается, но снижается до допустимых пределов. Максимальная величина поперечного напряжения со стороны передающего конца линии примерно равна 0,15 кВ (по отношению к напряжению 10 кВ) на один МВА мощности нагрузки при $\cos\varphi$ в диапазоне от 0,7 до 0,95. При мощности нагрузки 16 МВт рекомендуемый $k_t = \frac{41}{10 - 2,5j}$. Векторная диаграмма напряжений для этого случая приведена на рис. 4, б. Несимметрия напряжений со стороны нагрузки после включения продольно-поперечного регулирования фазы А составила 1,2 %.

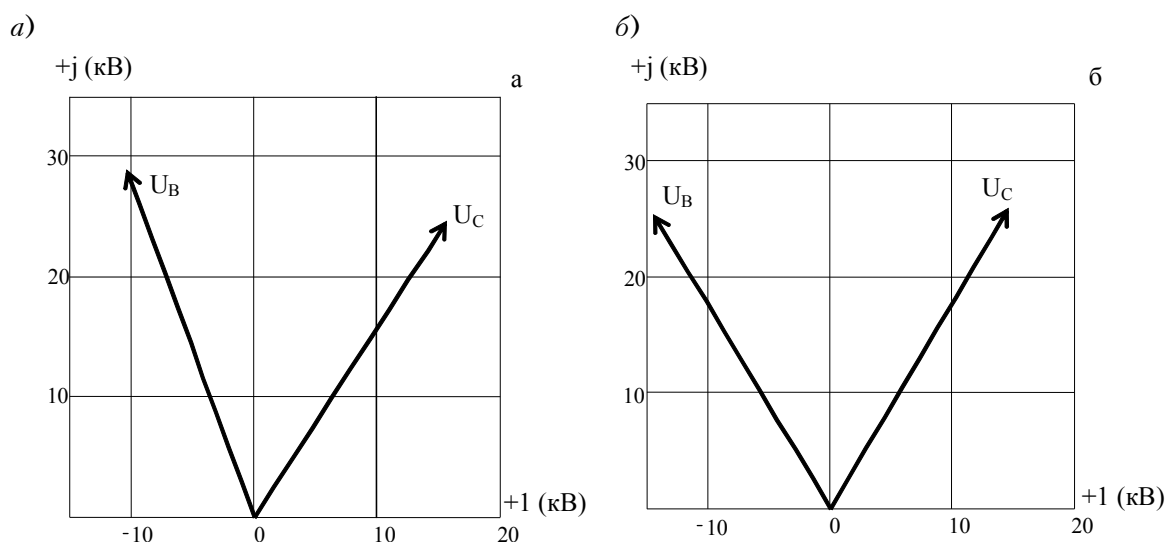


Рис. 4. Векторные диаграммы

Симметризование режима включением последовательно с заземляемой обмоткой трансформатора индуктивности

Причина появления несимметрии напряжений заключается в том, что для заземляемой фазы сопротивление линии равно нулю. Если между заземляемой обмоткой трансформатора и землей включить сопротивление, равное сопротивлению прямой последовательности линии, то несимметрии напряжений на стороне низкого напряжения как со стороны генератора, так и со стороны нагрузки не будет. Это подтверждается расчетами. Но сопротивление провода состоит из активной части и индуктивной. Можно допустить включение только индуктивной составляющей сопротивления, так как включение активного сопротивления неизбежно будет сопровождаться потерями мощности, что сводит на нет преимущество четырехфазных электропередач.

Индуктивные сопротивления можно включать как со стороны генератора, так и со стороны нагрузки, а можно частями с обеих сторон. Последнее предпочтительней, так как меньше напряжения фаз относительно земли. Расчеты

показали, что максимальное снижение несимметрии напряжений наступает при сумме сопротивлений, включаемых с обеих сторон, равных $j45 \text{ Ом}$. (Реактивная составляющая продольного сопротивления прямой последовательности равна $j40 \text{ Ом}$.) Однако ввиду того, что частично восстанавливается сопротивление фазы, увеличиваются линейные напряжения и соответственно снижается предел передаваемой мощности. При отсутствии емкостей симметрирующего устройства предел передаваемой мощности четырехфазной передачи с включением индуктивного сопротивления к заземляемой фазе трансформатора снижается до 11 МВт. При передаче этой мощности несимметрия напряжений на шинах нагрузки составляет 4 % против 6,8 % без симметрирования.

Однако на настоящий момент промышленность не производит продольные реакторы с регулируемым сопротивлением, измеряемыми единицами и десятками ом. А со стороны 0,4 кВ можно использовать токоограничивающие реакторы 6–10 кВ, выполнив отпайку от нескольких витков. Поэтому схему с продольным включением реакторов на напряжении 0,4 кВ можно осуществить, используя исключительно оборудование, выпускаемое отечественной промышленностью.

Дальнейшее снижение несимметрии требует использования симметрирующих устройств. Однако мощность батарей конденсаторов симметрирующего устройства существенно ниже, чем в четырехфазной передаче без включения индуктивного сопротивления к заземляемой фазе трансформатора. На 1 МВт передаваемой мощности при $\cos\phi$, равном 0,8, требуется 0,225 МВАр конденсаторов. Предел передаваемой мощности в этой схеме составляет 12 МВт. Таким образом, при передаваемой мощности, равной 12 МВт, мощность батарей конденсаторов симметрирующего устройства составляет 2,7 МВАр.

Несомненным достоинством этой схемы является ее экономичность по сравнению с просто симметрированием напряжения емкостями. Катушки индуктивности по сравнению с емкостями в несколько раз дешевле и технология их изготовления отработана. Тем более что плавного регулирования индуктивности не требуется.

Симметрирование режима включением несимметричной активной нагрузки

Если нельзя включить последовательно с заземляемой обмоткой трансформатора активное сопротивление, то предлагается перенести это включение на сторону низкого напряжения. Выше предлагалось выполнять симметрирующее устройство из емкостей. Очевидно, что можно симметрировать напряжения и несимметричным включением активных сопротивлений. Осуществляется это несимметричным включением бытовой нагрузки. В настоящее время бытовую нагрузку распределяют между фазами поровну. Предлагается перераспределить ее так, чтобы снизить несимметрию до допустимых величин. Расчеты показывают, что если в схеме с заземлением обмотки трансформатора через индуктивность 8,5 МВт подключить симметрично, а 3,2 МВт распределить между напряжениями U_{BC} и U_{CA} в пропорции 2 : 1, то несимметрия напряжений снизится до 0,5–1 %. Предел передаваемой мощности соответственно равен 11,7 МВт.

Достоинством этой схемы является отсутствие управляемых батарей конденсаторов. Предел передаваемой мощности по сравнению с предыдущей схемой снижается незначительно.

Сравнительный анализ схем симметрирования

Так как несимметрию напряжений можно исключить, единственным фактором, ограничивающим предел передаваемой мощности, является максимальное напряжение на фазах линии. На рис. 5 приведена зависимость максимального напряжения на линии с симметрированием напряжения емкостными батареями от активной мощности нагрузки при тех же условиях, что и в трехфазной линии.

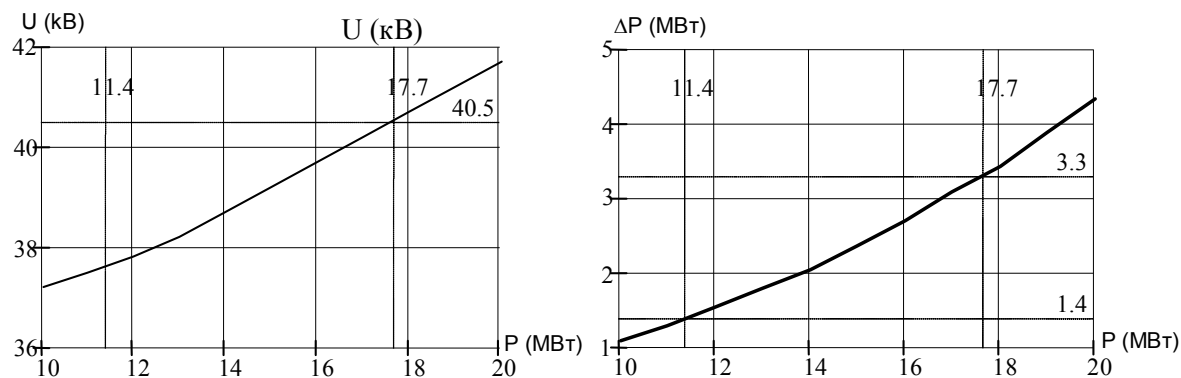


Рис. 5. Зависимость максимального напряжения и потерь мощности на линии с симметрированием напряжения емкостными батареями от активной мощности нагрузки

Ограничимся тем же пределом, что и при анализе трехфазных линий — 40,5 кВ. При этом напряжении можно передать 17,7 МВт, что в 1,55 раза больше, чем по двум трехфазным цепям. При предельной передаваемой мощности двухцепной трехфазной линии — 11,4 МВт максимальное напряжение на четырехфазной линии не превышает 37,5 кВ. Различие в потерях напряжения в трехфазной и четырехфазной линиях (при одной и той же мощности потери напряжения в четырехфазной линии меньше) объясняется следующим. Как в трехфазной, так и в четырехфазной линиях при одинаковых передаваемых мощностях и линейных напряжениях линейные токи одинаковы и создают одинаковые падения напряжения. Но в трехфазной линии эти падения напряжения создаются в трех фазах, поэтому падение линейного напряжения равно $\dot{U}_л = \sqrt{3}\dot{U}_\phi = \sqrt{3}\dot{I}_\phi Z_\phi$. В четырехфазной же линии падение линейного напряжения определяется только фазным током $\dot{U}_л = \dot{I}_\phi Z_\phi$, т.е. в $\sqrt{3}$ меньше, чем в трехфазной.

Еще больше отличаются потери мощности в четырехфазной и двухцепной трехфазной линиях. При передаче максимальной мощности двухцепной трехфазной линии, равной 11,4 МВт, по четырехфазной потери в последней составляют 1,94 МВт против 3,44 МВт в двухцепной трехфазной, или в 1,77 раза меньше. Еще больше отличие потерь в четырехфазной и одноцепной трехфазной при передаче максимальной мощности трехфазной линии — 5,7 МВт. В четырехфазной линии потери составляют 0,435 против 1,72 МВт в трехфазной, что в 3,95 раза меньше.

Объяснение достаточно простое. Потери мощности одноцепной трехфазной линии можно определить как:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R,$$

где P и Q — мощность со стороны приемника, U — линейное напряжение там же, R — активное сопротивление линии. В двухцепной трехфазной линии эти потери в два раза выше. Так как при передаче максимальной мощности напряжение в конце линии минимальное (в расчетах принималось равным $0,9U_N$), то потери мощности примерно в 1,25 раза больше, чем при номинальном напряжении. А в четырехфазной линии потери мощности равны:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{1,5U^2} R.$$

Кроме того, при мощности, максимальной для трехфазной двухцепной линии (11,4 МВт), напряжение в четырехфазной линии выше номинального.

Однако для симметрирования режима требуется большая мощность управляемых конденсаторных батарей. При мощности нагрузки 10 МВт мощность конденсаторов должна быть 7,4 МВАр. Если использовать такую батарею конденсаторов в трехфазной двухцепной передаче, то можно передать 14 МВт. Поэтому рекомендовать этот способ симметрирования можно только после технико-экономического сравнения. Низкие потери мощности могут оказаться недостаточными, чтобы компенсировать затраты на установку симметрирующего устройства.

При продольно-поперечном однофазном регулировании коэффициента трансформации максимальная передаваемая мощность несколько меньше — 17 МВт из-за повышенного напряжения на одной фазе линии со стороны питания. Тем не менее это в 1,49 раза больше, чем у двух трехфазных цепей. Потери мощности в этом случае примерно те же, что и при симметрировании напряжения конденсаторными батареями.

Недостатком этой схемы является необходимость создания новых трансформаторов. Хотя это непринципиальное возражение. Чтобы рекомендовать эту схему, требуется дополнительное исследование: надо определить, как влияет продольно-поперечное регулирование на симметрию напряжений на генерирующей подстанции.

Схема с включением сопротивления последовательно с заземляемой фазой трансформатора требует мощности симметрирующих устройств примерно в три раза меньшую, чем без включения. Это делает схему привлекательной. При практически одинаковом пределе передаваемой мощности с двухцепной трехфазной линией потери в предельном режиме в четырехфазной передаче меньше в 1,7 раза.

С технической точки зрения схема с включением индуктивностей последовательно с заземляемыми обмотками трансформаторов и емкостным симметрирующим устройством является аналогом первой схемы. Поэтому все выводы, полученные для первой схемы, справедливы и для нее. Но ввиду того, что в заземляемую фазу включается сопротивление, по потерям напряжения схема приближается к симметричной трехфазной. Поэтому предел передаваемой мощности у нее ближе к пределу передаваемой мощности трехфазной двухцепной линии. Это не касается потерь мощности. Несмотря на то, что потери мощности здесь выше, чем в первой схеме из-за увеличенных потерь напряжения, они в три раза меньше потерь двухцепной трехфазной линии, у которой потери выросли

из-за меньшей компенсации реактивной мощности (мощность компенсирующих устройств третьей меньше в 3,2 раза, чем у первой схемы). Диапазон передаваемых мощностей от нуля до 12 МВт.

Схема с перераспределением бытовой нагрузки вообще не требует затрат на конденсаторные батареи. Имеет практически одинаковый предел передаваемой мощности с предыдущей схемой. Но по сравнению с двухцепной трехфазной без конденсаторных батарей предел передаваемой мощности больше только в 1,17 раза. Потери мощности такие же, как и в предыдущей схеме. Схема является наиболее перспективной. Однако применение этой схемы в каждом конкретном случае требует исследования всех режимов в течение суток от минимального летнего до максимального зимнего, так как бытовая нагрузка и промышленная изменяются по-разному как в течение года, так и в течение суток.

Технические характеристики схем симметрирования напряжений на нагрузке при разных способах включения четырехфазных электропередач приведены в таблице.

Схема симметрирования	Технические характеристики схем симметрирования напряжений на нагрузке при включении четырехфазных электропередач			
	емкостным симметрирующим устройством	с включением индуктивностей последовательно с заземляемыми обмотками трансформаторов и емкостным симметрирующим устройством	с включением индуктивностей последовательно с заземляемыми обмотками трансформаторов и несимметричным включением бытовой нагрузки	с продольно-поперечным регулированием напряжения заземляемой фазы трансформатора
Предел передаваемой мощности, МВт	17,7	12,0	11,7	17,0
Мощность симметрирующего устройства, МВАр/МВА нагрузки	0,59	0,18	—	—
Мощность симметрирующего устройства на 10 МВт нагрузки	7,4	2,25	—	—
Потери мощности при нагрузке, равной 10 МВт (МВт)	0,62	0,79	0,97	1,43
Кол-во индуктивных катушек	—	4	4	—
Предел передаваемой мощности при отключении одной фазы, МВт	13,0	10,4	5,0 (заземление с двух сторон неповрежденной фазы поврежденной цепи)	8,0
Мощность симметрирующего устройства на 10 МВт нагрузки при отключении одной фазы	7,5	2,8	—	—
Предел передаваемой мощности при отключении двух фаз, МВт	6,7	4,5	5,0	8,5
Мощность симметрирующего устройства при отключении двух фаз	—	—	—	—
Потери мощности в двухцепной трехфазной линии при мощности нагрузки 10 МВт и мощности компенсирующего устройства, равной мощности симметрирующего устройства четырехфазной передачи, МВт	2,0	2,4	3,05	3,05

Выводы

1. Четырехфазные электропередачи по сравнению с двухцепными трехфазными имеют в 1,5–1,7 раза меньшие потери мощности.

2. Отсутствие одной фазы в линии является причиной появления несимметрии напряжений, которая с увеличением передаваемой мощности увеличивается. Снизить несимметрию напряжений можно четырьмя способами:

- включением на одно линейное напряжение емкостных батарей;
- продольно-поперечным регулированием коэффициента трансформации обмоток заземляемой фазы с питающей стороны линии;

- включением последовательно с заземляемыми обмотками трансформатора индуктивных сопротивлений, сумма которых равна индуктивному сопротивлению прямой последовательности линии;

- несимметричным включением бытовой нагрузки.

3. Наиболее предпочтительной, на наш взгляд, является схема с включением последовательно с заземляемыми обмотками трансформатора индуктивных сопротивлений и дополнительно несимметричным включением бытовой нагрузки. Схема не предусматривает конденсаторных симметрирующих устройств.

4. Электроснабжение нетяговых потребителей железной дороги предлагается осуществлять по схеме «четыре провода — рельс».