

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Электрификация железных дорог имеет большое значение для страны - это высоко эффективный технологический процесс при транспортировке грузов. Например, по сравнению с железнодорожным транспортом на электрической тяге удельный расход условного топлива речным транспортом выше в 2,9 раза, автомобильным на дизельном топливе – в 14 раз, железнодорожным транспортом на тепловозной тяге - в 1,46 раза. В целом себестоимость перевозок электрической тягой ниже, чем тепловозной, в 1,5 раза.

На выполняемые электрической тягой почти три четверти объёма перевозок затрачивается около 5% потребляемой в стране электроэнергии, в то время как тепловозной тягой на 25% объёма перевозок потребляется около 13% дизельного топлива. Сколько энергоресурсов позволяет высвободить электрическая тяга видно из примера. На перемещение одной тонны груза на расстояние 100 км электрической тягой затрачивается около 1 кВт ч электроэнергии. Такое количество электроэнергии расходует семья во время вечернего просмотра телевизионных про-грамм. Автомобиль «Жигули» сжигает до 10 литров бензина на 100 км (в пересчёте на электроэнергию это составляет 43 кВт ч).

В силу специфики структурных перевозок и весовых норм в России удельный расход электроэнергии на тягу поездов ниже, чем за рубежом.

На всех этапах развития электрификация была ведущим звеном реконструкции железнодорожного транспорта. Электрификация железных дорог - это не узкая транспортная задача. Она способствует ускорению технического прогресса во всём хозяйстве страны, непосредственно влияет на освоение новых районов.

Основные преимущества электрификации железных

дорог:

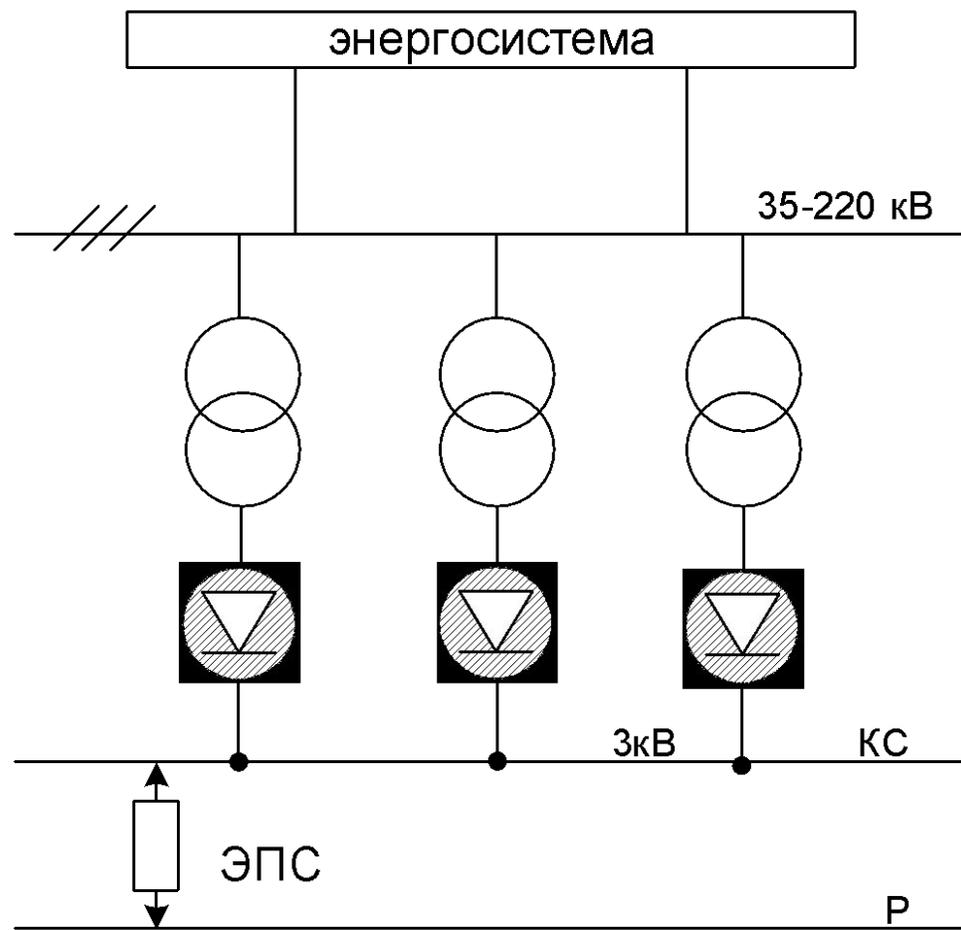
- - повышение пропускной и провозной способности железных дорог;
- - повышение производительности труда не только в локомотивном хозяйстве, но и по другим службам, что позволило снизить себестоимость перевозок на 30-40%;
- - быстрая окупаемость капитальных затрат на электрификацию (3-4 года);
- - повышение устойчивости работы железных дорог особенно в районах с тяжёлыми климатическими условиями. Суммарное количество порч, сопровождаемое заходами электровозов на внеплановые ремонты, в 2-2,5 раза меньше, чем тепловозов;
- - улучшение условий труда, а также социально-бытовых условий железнодорожников;
- - сокращение потребления топливно-энергетических ресурсов, так как для выработки электроэнергии используется низкосортное топливо и часть её вырабатывается на ГЭС и АЭС;
- - электрическая тяга - это единственный вид транспорта, который обладает свойством вырабатывать и возвращать в сеть электроэнергию при рекуперативном торможении. Рекуперативное торможение повышает безопасность движения на горных участках, способствует снижению износа тормозного оборудования;
- - электрифицированные железные дороги повышают загрузку энергосистем (особенно в ночное время), создают условия для объединения отдельных энергосистем. При этом оказывается возможным закрыть местные не рентабельные электростанции;
- - при электрической тяге существенно снижается загрязнение окружающей среды, это самый экологически чистый вид транспорта

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Основной задачей системы электроснабжения является обеспечение эксплуатационной работы железных дорог. Эта задача может быть решена только при правильно выбранных параметрах устройств электроснабжения. Для обеспечения нормальной работы электрических железных дорог необходимо поддерживать определённый уровень напряжения у электроподвижного состава. Элементы устройств системы электроснабжения по возможности должны иметь резерв. Необходимы специальные меры для снижения мешающих и опасных влияний электрических железно дорог на смежные сооружения. Необходимо на дорогах однофазного переменного тока принимать специальные меры для снижения несимметрии токов и напряжений. На дорогах постоянного тока одним из требований является защита подземных сооружений от коррозии, вызываемой блуждающими токами.

3. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ РАЗНЫХ ВИДАХ ТЯГИ

Принципиальная схема питания дороги постоянного тока



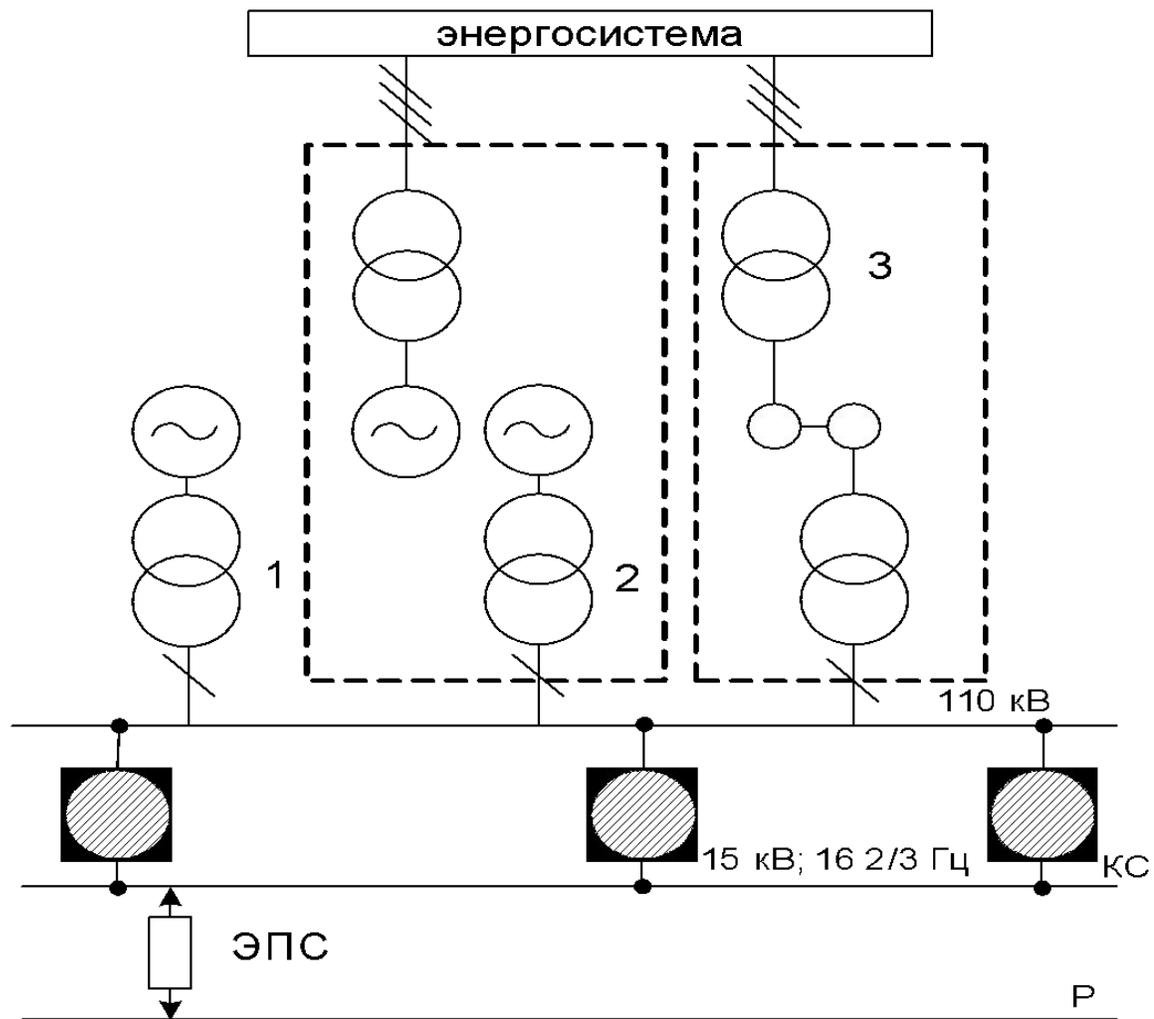
Преимущества:

- простота электроподвижного состава;
- симметричная нагрузка питающей линии электросистемы.

Недостатки:

- небольшое расстояние между подстанциями (порядка 15-20 км);
- большое сечение контактной подвески;
- большие потери в пусковых реостатах (12-15% от потребляемой энергии на магистральных дорогах и 25% на метрополитене);
- коррозия подземных сооружений и арматуры опор контактной сети;
- из-за больших токов наблюдается большой износ контактного провода.

Принципиальная схема питания дороги однофазного тока пониженной частоты



1 - железнодорожная электростанция пониженной частоты; 2 - объединенная электростанция промышленной и пониженной частоты; 3- подстанция с преобразователями фаз и частоты.

Преимущества:

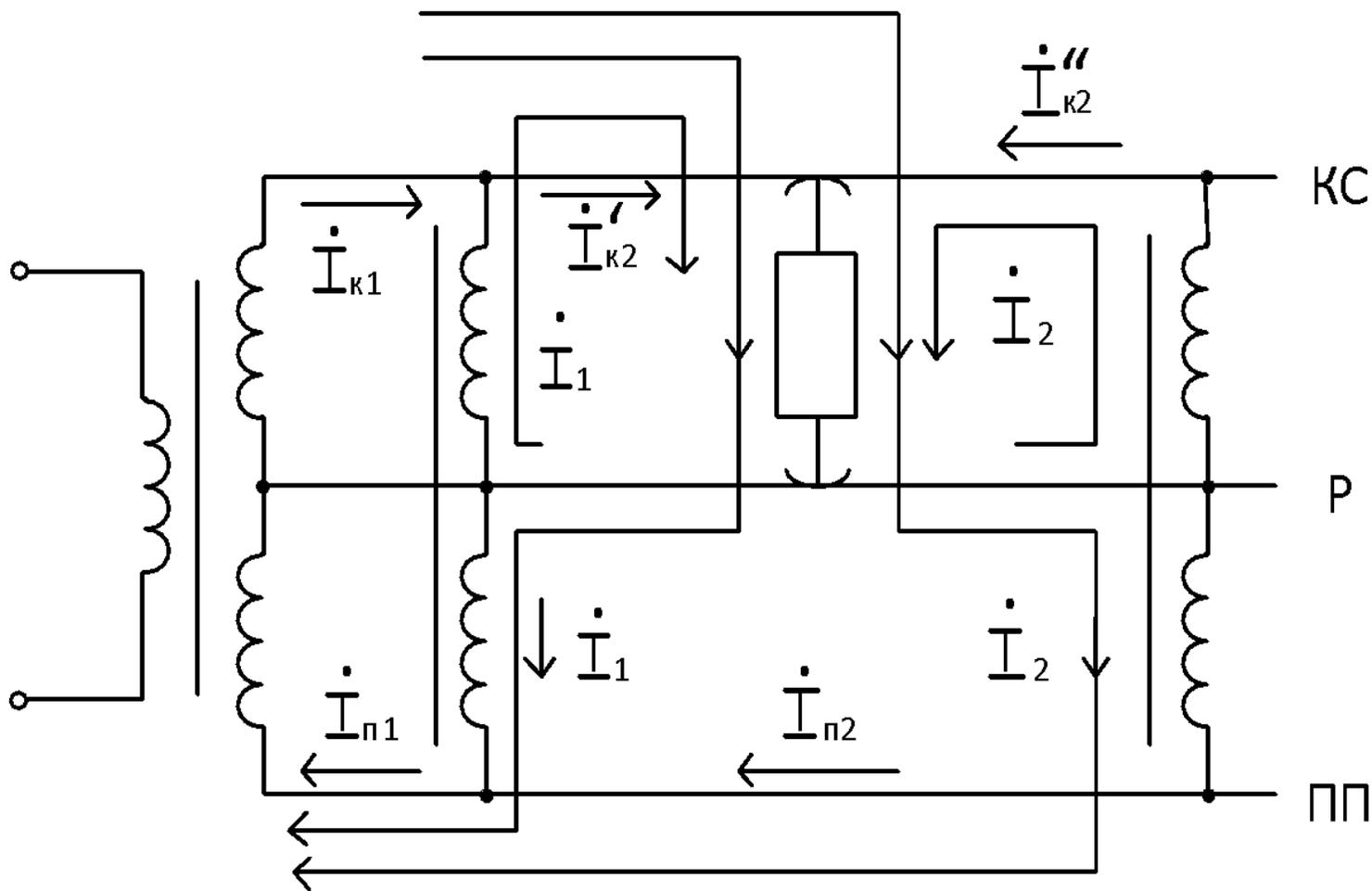
- расстояния между подстанциями 40-60 км, как и в системе однофазного тока промышленной частоты. Это возможно из-за меньшего индуктивного сопротивления тяговой сети при пониженной частоте;
- симметричная нагрузка питающей линии;
- в этой системе применяются коллекторные двигатели, характеристики которых близки к серийным двигателям постоянного тока.

Недостатки:

- коллекторные двигатели имеют низкий коэффициент мощности (в режиме тяги 0,8-0,88; при трогании 0,3-0,4; в среднем 0,6);
- существенное влияние на линии связи;
- сложность рекуперации электрической энергии;
- невозможно питание нетяговых железнодорожных потребителей.

частоты; 2 - объединенная частоты; 3- подстанция с

Трехпроводная система электроснабжения с автотрансформаторами



При этой системе на тяговых подстанциях с помощью специальных трансформаторов или дополнительных автотрансформаторов обеспечиваются два одинаковых или различных напряжения. Одно из них, соответствующее номинальному напряжению электроподвижного состава, подается между контактной сетью (КС) и рельсами, а второе – между рельсами и питающим проводом (ПП), подвешиваемым на опорах контактной сети. При этом напряжение между контактной сетью и питающим проводом равно сумме этих напряжений.

Для снижения напряжения между контактной сетью и питающим проводом до напряжения подвижного состава на фидерной зоне через 8-15 км устанавливают автотрансформаторы (АТ).

Трехпроводная система электроснабжения с авто-трансформаторами разработана как способ усиления системы однофазного переменного тока. По системе однофазного переменного тока 11 кВ в 1907г. в США была электрифицирована железнодорожная линия в районе Нью-Йорка. Вследствие значительного увеличения размеров движения система 11 кВ оказалась недостаточно мощной и в 1914 г. была преобразована в трехпроводную систему с автотрансформаторами при напряжениях контактная сеть – рельсы и питающий провод – рельсы 11 кВ.

До 30-х годов XX века в США по системе с авто-трансформаторами был электрифицирован ряд линий с большим пригородным движением и линии, где обращались тяжелые грузовые поезда. На железных дорогах Рединг (Филадельфия) и Вирджинской применена трехпроводная система с автотрансформаторами при напряжениях относительно рельсов 12 кВ в контактной сети и 24 кВ в питающем проводе.

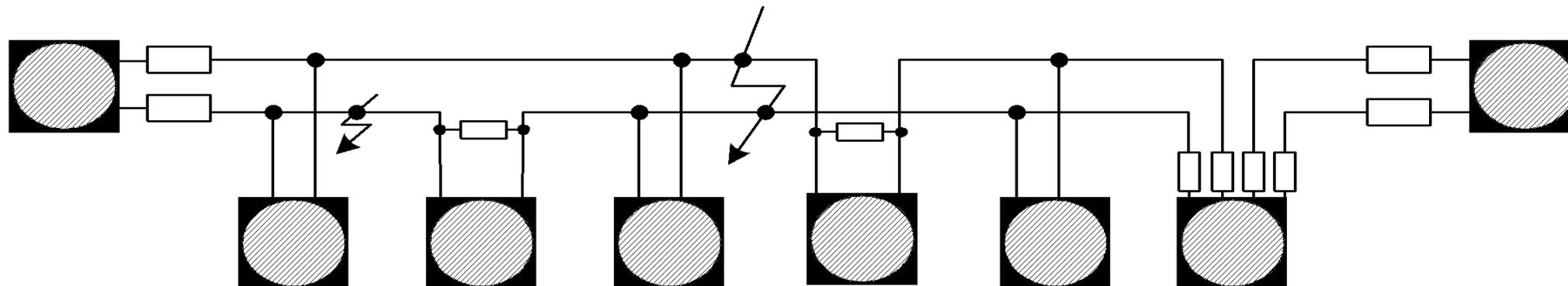
В конце 60-х - начале 70-х г. XX века эта система с напряжением контактная сеть - рельсы и питающий про-вод - рельсы 25 кВ применена на дорогах Японии при электрификации новых скоростных линий с целью увеличения расстояния между тяговыми подстанциями. В результате на скоростной линии Сан-Йо при мощности, потребляемой одним поездом 16МВт, расстояние между тяговыми подстанциями увеличено до 50 км по сравнению с 20 км в системе 25кВ на линии Новая – Токайдо.

4. СХЕМЫ ПИТАНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ОТ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Электрифицированная железная дорога является потребителем первой категории. Питание её должно быть предусмотрено от двух независимых источников. Таковыми считаются отдельные районные подстанции (РП), а также разные секции одной и той же подстанции. Поэтому схемы питания тяговых подстанций от энергосистемы на дорогах России должны быть такими, чтобы выход из работы одной из районной подстанции или питающей линии не мог бы явиться причиной выхода из строя более одной тяговой подстанции.

На дорогах России для обеспечения необходимой надежности число промежуточных тяговых подстанций, включаемых между опорными, при электротяге на переменном токе допускается не более трех при напряжении линии 110 кВ и не более пяти при напряжении 220 кВ. При электротяге на постоянном токе допускается не более пяти промежуточных подстанций.

Схема двустороннего питания тяговых подстанций переменного и постоянного тока при пяти промежуточных подстанциях



Требования к устройствам электроснабжения высокоскоростных линий

Для железных дорог а со скоростью движения до 160 км/ч характер электротяговой нагрузки подчиняются закону нормального (Гауссова) распределения. Выбор устройств электротяговой сети осуществляется, исходя из максимальных значений токовых нагрузок в течение времени цикла графика движения поездов.

Высокоскоростная железные дороги и железные дороги с интенсивным движением, повышенной пропускной способностью, с небольшим интервалами (3 - 15 мин) между поездами и потребляемой мощностью в 10 - 18 МВт и более имеют иной характер электротяговой нагрузки. Для таких линий характерна импульсная нагрузка, как для проводов электротяговой сети, так и для преобразователей и коммутационных аппаратов тяговых подстанций, постов секционирования, других линейных устройств. При этом возрастают пиковые нагрузки на тяговые подстанции, увеличиваются потери напряжения и энергии в устройствах тягового электроснабжения, усложняются условия токосяема и повышается нагревание проводов контактной сети.

Удельная мощность электропотребления высокоскоростных линий составляет 1 – 1,3 МВт/км, а для железнодорожных двухпутных линий с повышенной пропускной способностью может достигать 1,7 – 2,5 МВт/км. По нормам Международного союза железных дорог (МСЖД), разработанным в 1996-м году, для двухпутной высокоскоростной линии с максимальной скоростью 300 - 350 км/ч предусматривается максимальная удельная мощность потребления электроэнергии на тягу 3 МВт/км. Мощность устройств тягового электроснабжения рекомендуется принимать, исходя из указанной удельной мощности электропотребления. Потребная электротяговая мощность зависит от многих факторов, основными из которых является масса поезда, скорость движения, основное сопротивление движению, интервалы между поездами, частота троганий и разгонов, возможность рекуперативного торможения, план и профиль пути, характеристики сети тягового электроснабжения. Определение параметров электротяговой сети является сложной задачей, решение которых с требуемой точностью достигается современным методом физико-математического моделирования процесса высокоскоростного движения поездов.

Скорость движения поезда непосредственно зависит от уровня напряжения у токоприемников электроподвижного состава. На российских железных дорогах для линий со скоростью движения до 160 км/ч в нормальном режиме правилами установлено наименьшее напряжение на токоприемнике на любом участке не ниже 2,7 кВ для системы постоянного тока и 21 кВ переменном токе. Снижение напряжения от номинальных значений соответственно 3,0 кВ и 25 кВ до максимально допустимых уровней приводит к потере мощности электроподвижного состава на 15 % и к уменьшению средней технической скорости на 7 – 8 %. Для обеспечения требуемого качества электрического питания при переводе электрифицированных линий на скоростное движение осуществляется усиление устройств тягового электроснабжения, в результате которого наименьшее напряжение в номинальном режиме при скорости движения свыше 160 км/ч должно быть не ниже 2,9 кВ на постоянном токе и 24 кВ на переменном токе.

Способы усиления тягового электроснабжения

Основными способами усиления тягового электроснабжения являются:

- повышение уровня напряжения в электротяговой сети путём перевода электрифицированной линии на систему электрической тяге однофазного тока напряжением 25 кВ;
- в перспективе повышением уровня напряжения в контактной сети постоянного тока до 18 – 24 кВ и созданием электроподвижного состава постоянного тока высокого напряжения;
- применение системы распределённого питания электротяговой сети с продольными линиями высокого напряжения на переменном токе - система 2×25 кВ с автотрансформаторными пунктами;
- применение коаксиального кабеля;
- система с линейными преобразовательными пунктами питания контактной сети от продольной высоковольтной линии электропередач;

При усилении тягового электроснабжения также используется:

- автоматическое поддержания напряжения у токоприемников за счёт регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций;
- монтаж усиливающих проводов контактной подвески и увеличение сечения контактных проводов;
- применение схем питания контактной сети постом секционирования и пунктами параллельного соединения контактных подвесок обоих путей;
- сооружение на межподстанционных зонах дополнительных тяговых подстанций или пунктов питания;
- увеличение мощности тяговых подстанций и уменьшение длины межподстанционных зон;
- усиление внешнего электроснабжения и ограничение отклонений уровня напряжения на вводах тяговых подстанций.

Эффект от применения отдельных мероприятий различен и, как правило, является недостаточным. Усиление тягового электроснабжения конкретной линии для достижения требуемых показателей качества электроснабжения высокоскоростных поездов выполняется при комплексном применении мер. Наряду с техническими мероприятиями, снижение потерь напряжения в тяговой сети может быть достигнута за счёт рациональной организации движения. Например, введение пакетного графика движения скоростных поездов с интервалами между ними, равными временами хода по наиболее длинному участку между тяговыми подстанциями, что обеспечивает нахождения на каждой межподстанционной зоне только одного поезда.

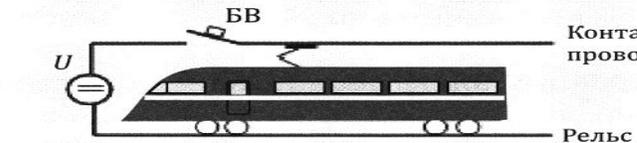
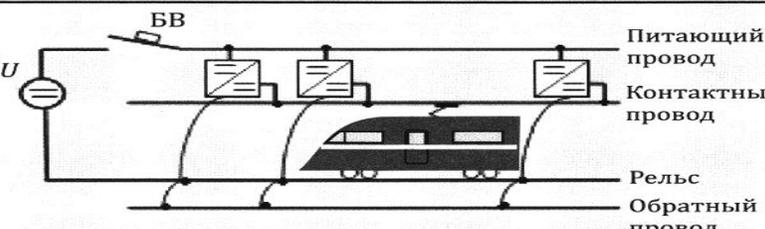
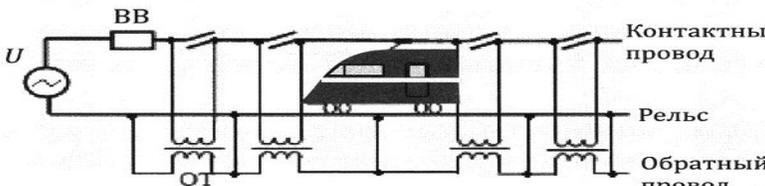
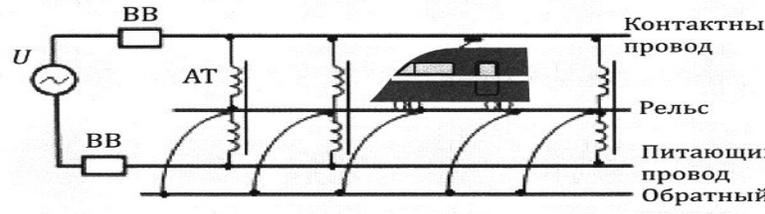
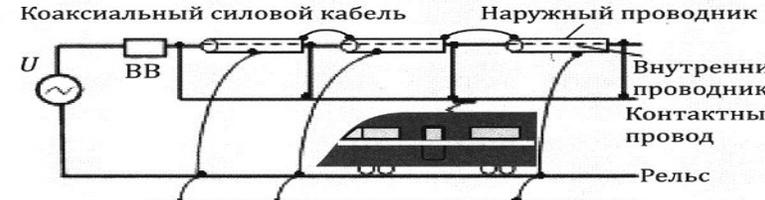
СИСТЕМА		СХЕМА
Постоянного тока	Централизованное питание (ЦП)	 <p>Контактный провод Рельс</p>
	Распределенное питание (РП)	 <p>Питающий провод Контактный провод Рельс Обратный провод</p>
Переменного тока	С отсасывающими трансформаторами (ОТ)	 <p>Контактный провод Рельс Обратный провод</p>
	С автотрансформаторами (АТ)	 <p>Контактный провод Рельс Питающий провод Обратный провод</p>
	С коаксиальным кабелем (КК)	 <p>Коаксиальный силовой кабель Наружный проводник Внутренний проводник Контактный провод Рельс</p>

Схема питания и секционирования контактной сети на линиях постоянного тока

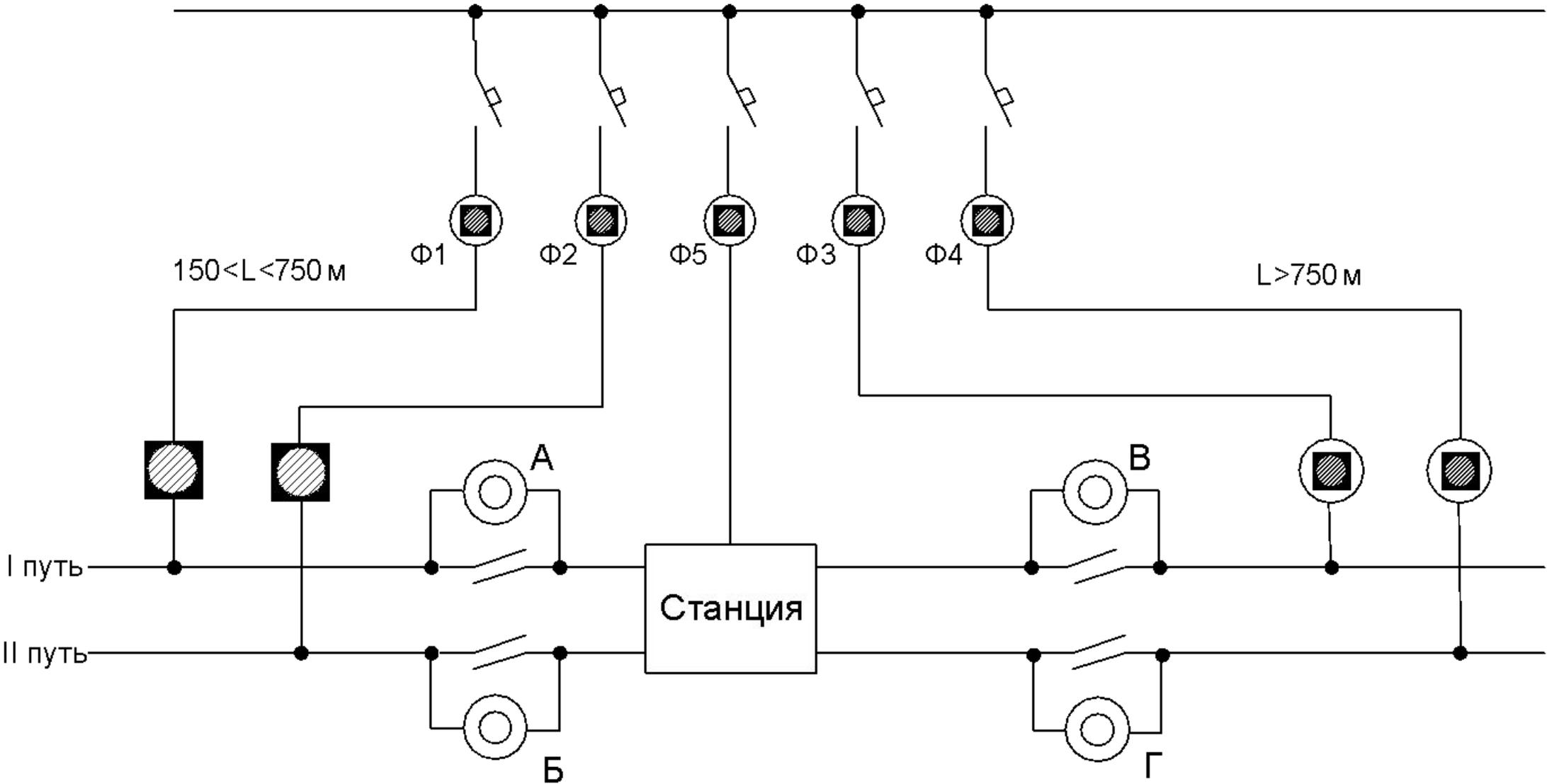
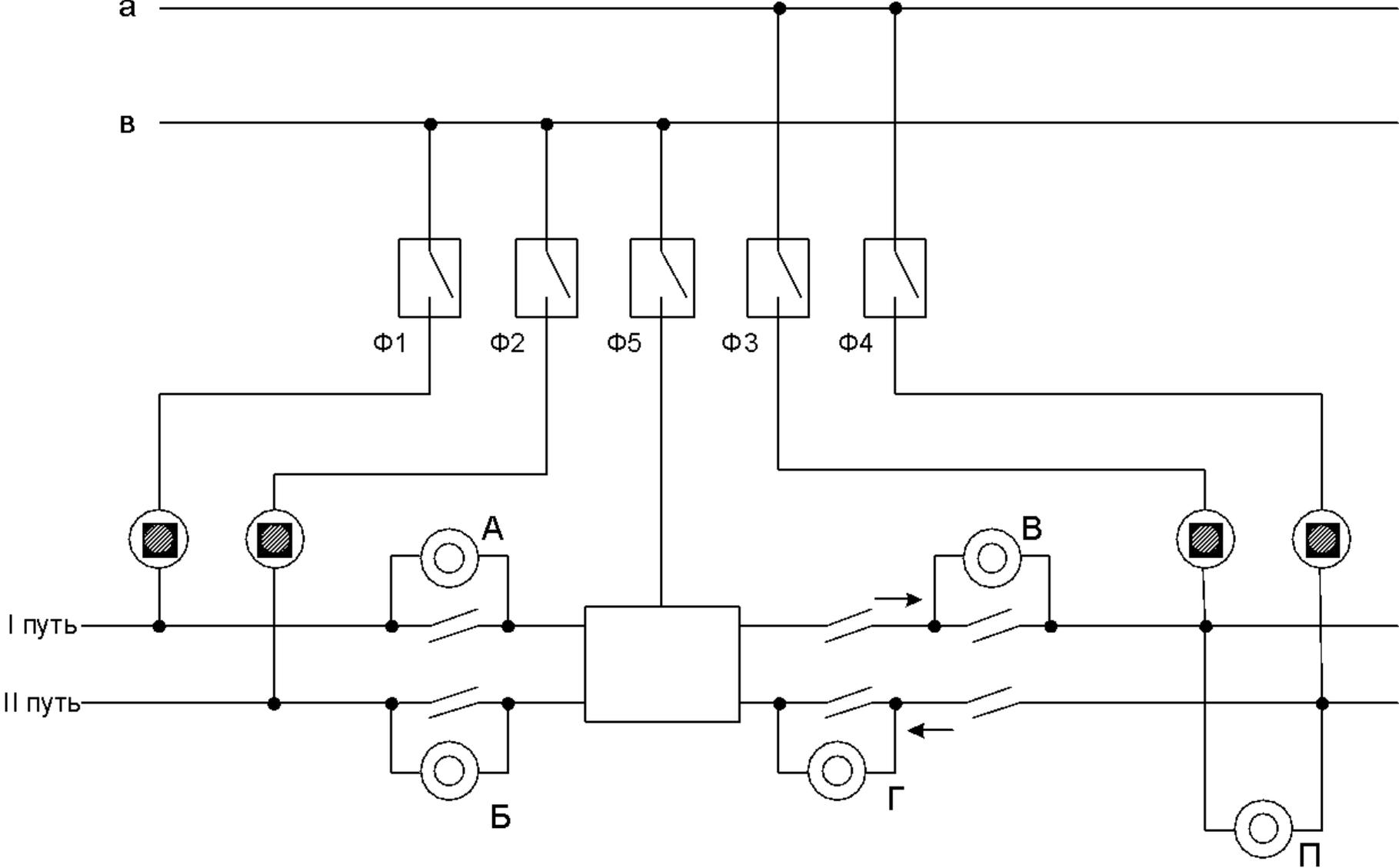
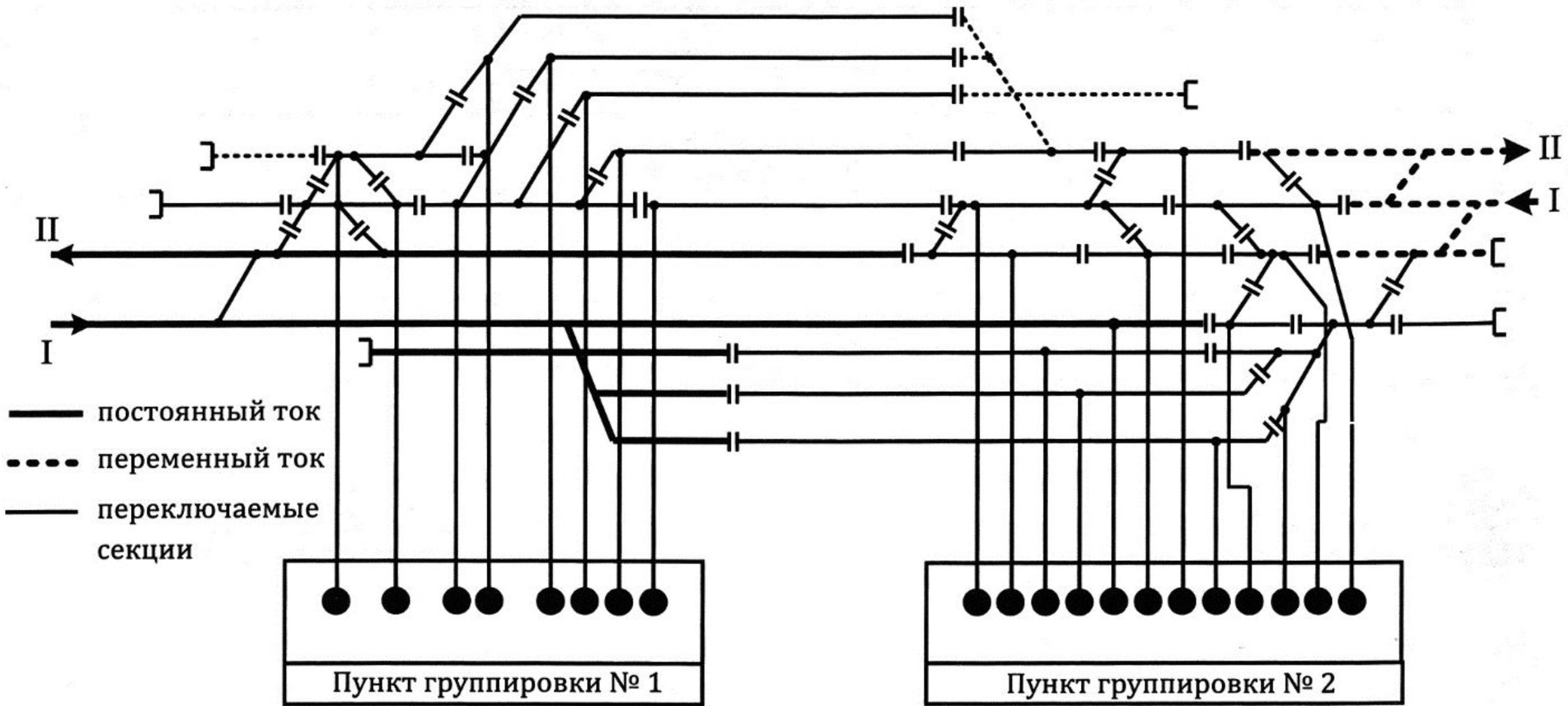


Схема питания и секционирования контактной сети на линиях переменного тока





Упрощенная схема станции стыкования параллельного типа

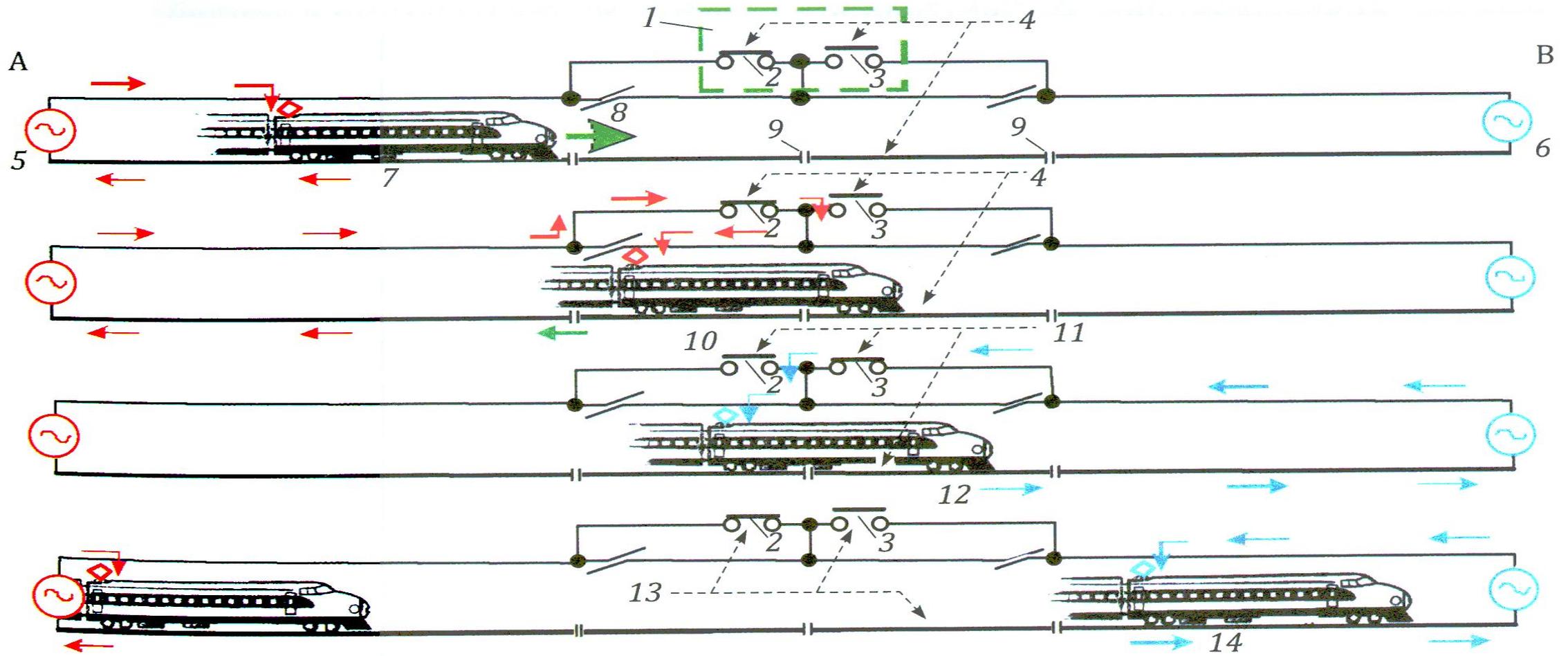
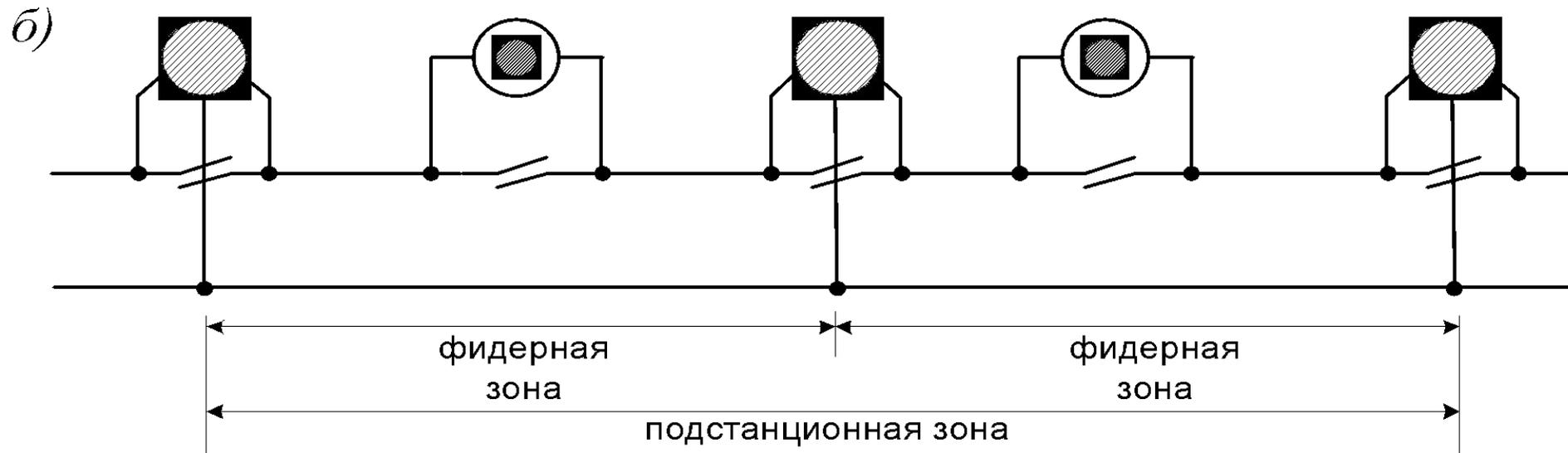
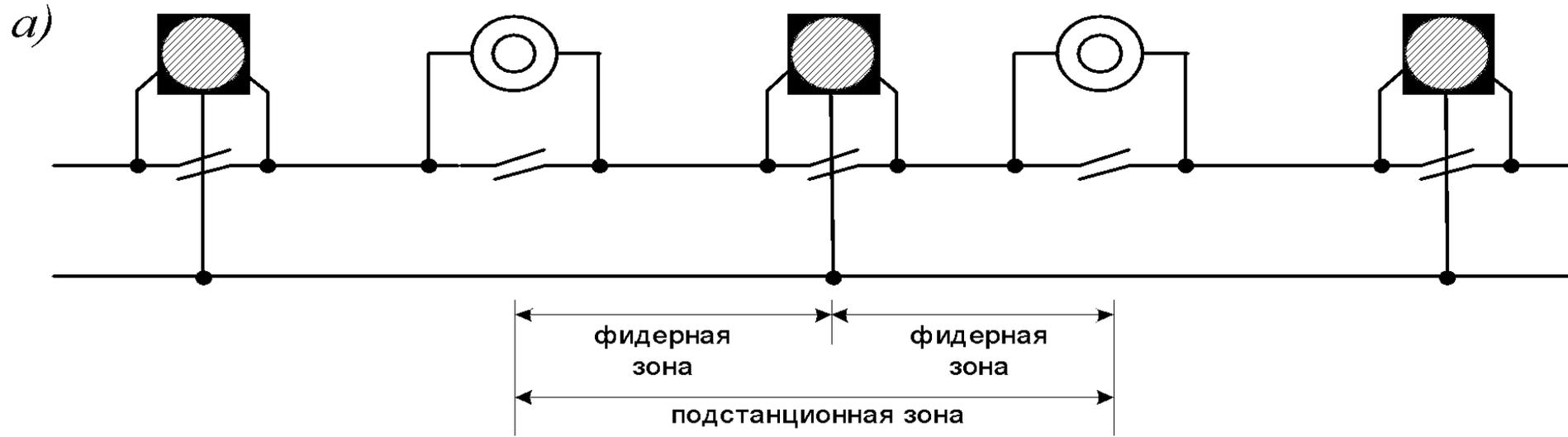
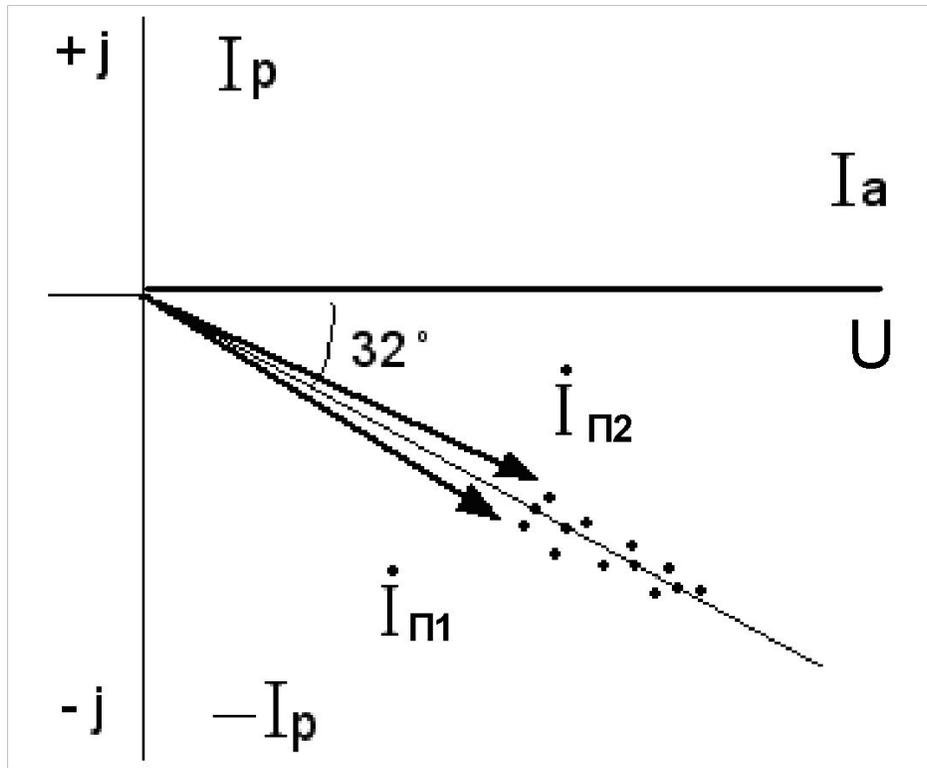


Схема действия поста секционирования у нейтральной вставки: 1 — пост секционирования; 2, 3 — быстродействующие автоматические переключатели; 4, 11, 13 — от узла выработки командных сигналов; 5, 6 — зоны питания от разных фаз энергосистемы; 7, 10, 12, 14 — высокоскоростной поезд на последовательных стадиях прохождения зоны; 8 — изолирующее воздушное сопряжение; 9 — дроссельный стык

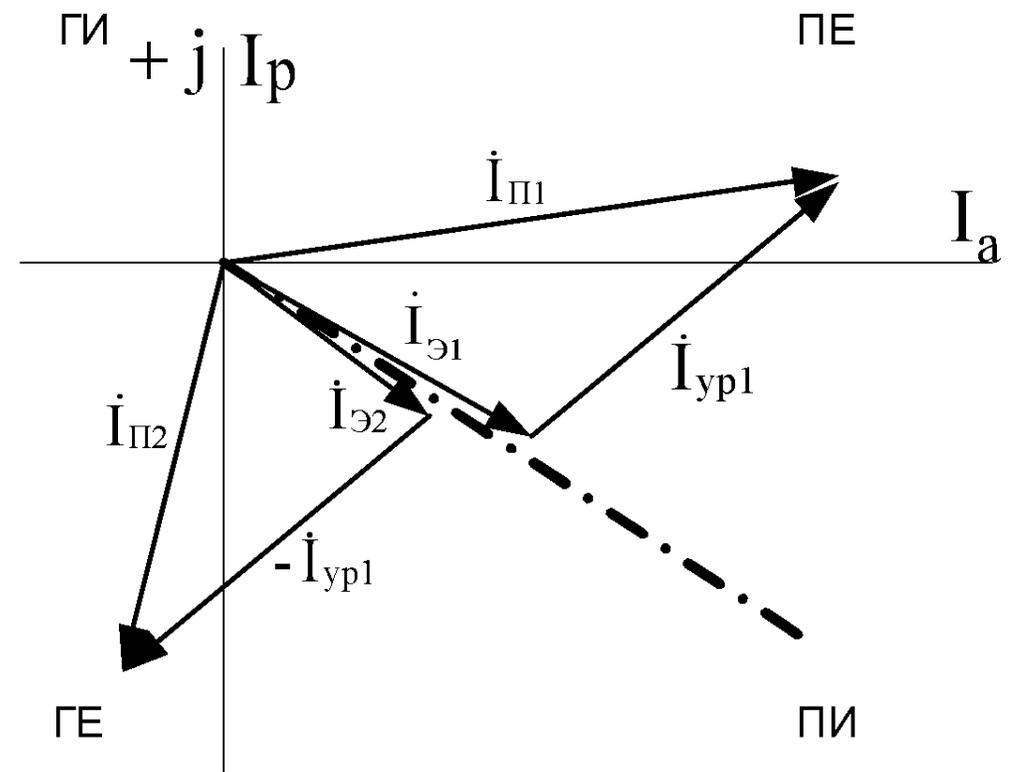
Схемы одностороннего и двустороннего питания контактной сети



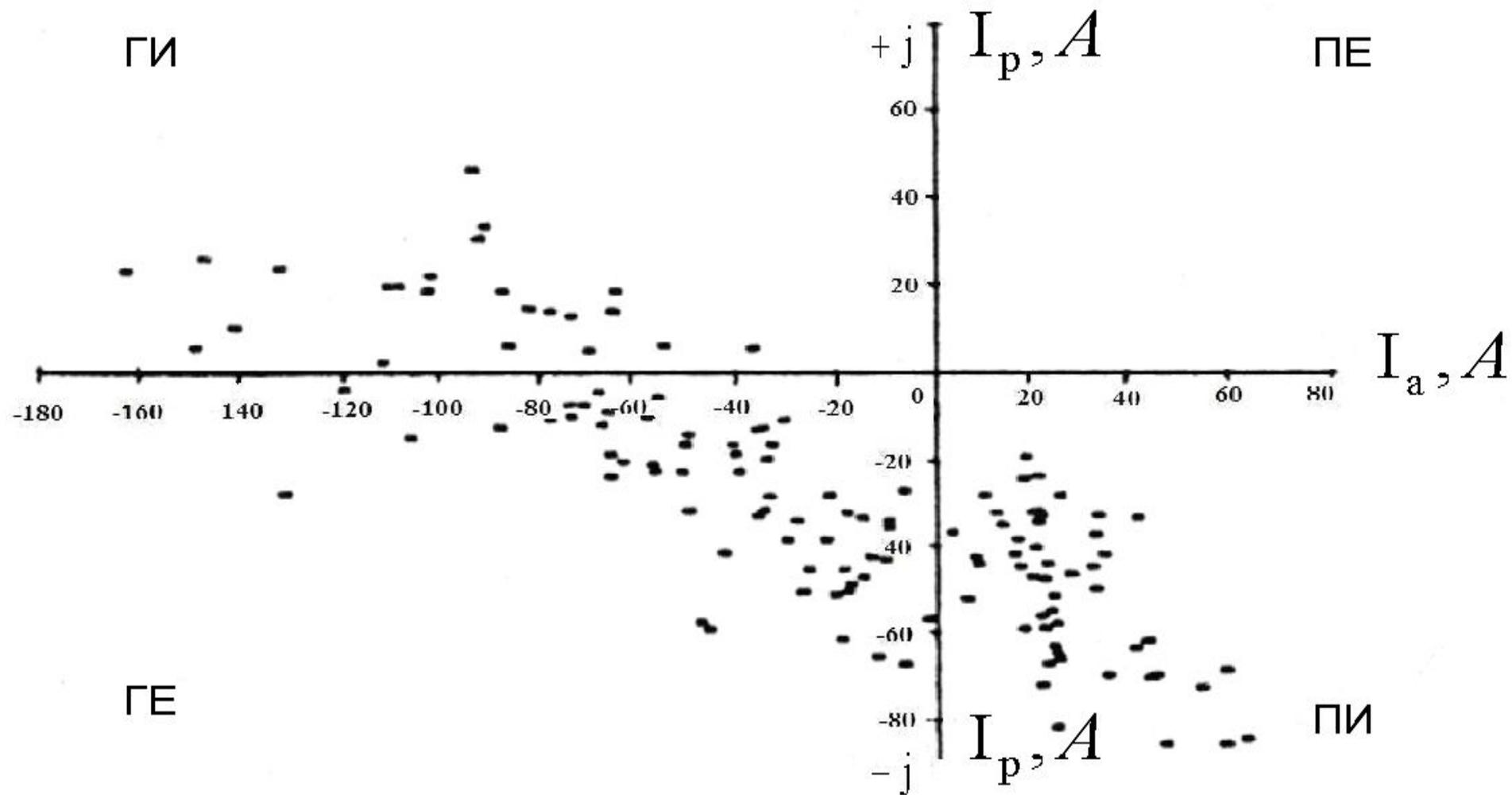
Токи плеч питания тяговых подстанций при одностороннем питании тяговой сети



Формирования токов плеч питания соседних тяговых подстанций, работающих параллельно

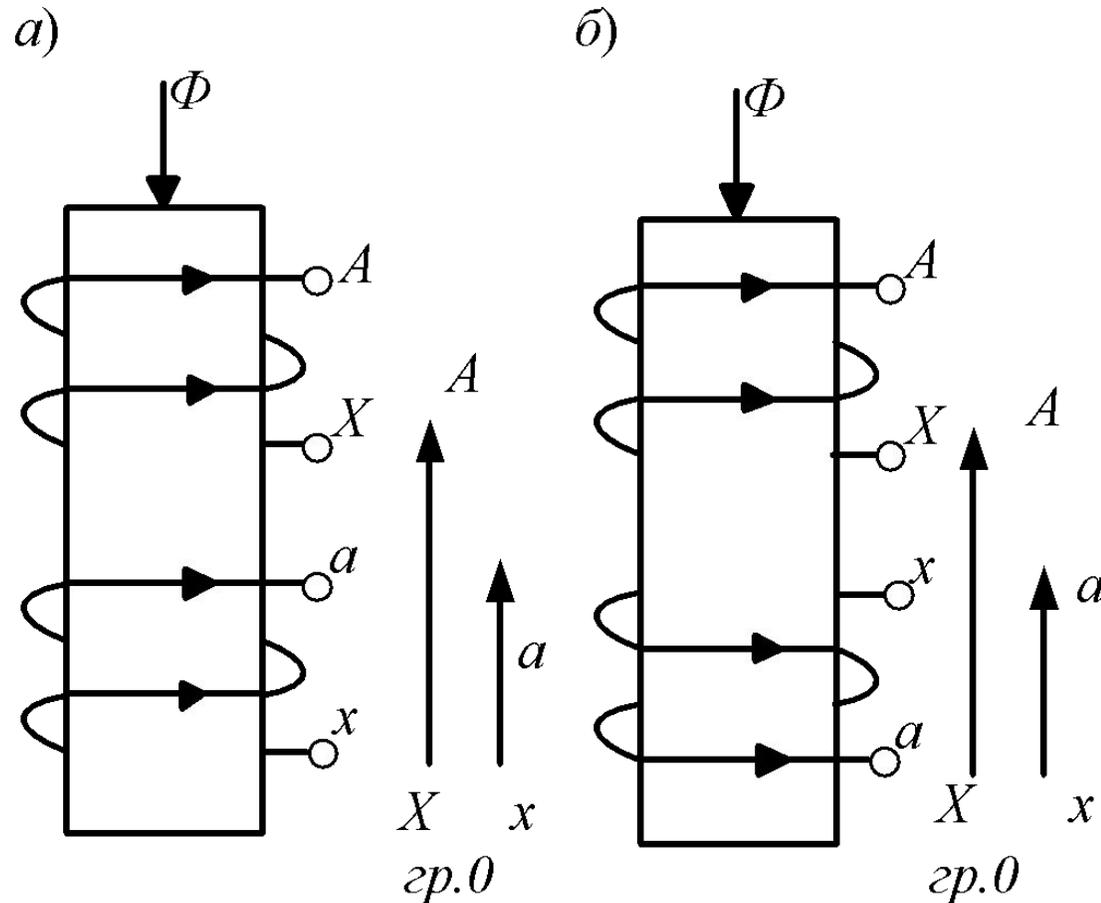


Результаты замеров токов плеч питания на подстанции Рыбное



Схемы соединения обмоток трансформаторов на тяговых подстанциях переменного тока и присоединение трансформаторов к питающей линии и тяговой сети

Система обозначений в схемах



ЭДС в обмотках трансформаторов, находящихся на одном стержне

Схемы соединения обмоток трансформаторов в системе 25 кВ

1. Трехфазные трансформаторы

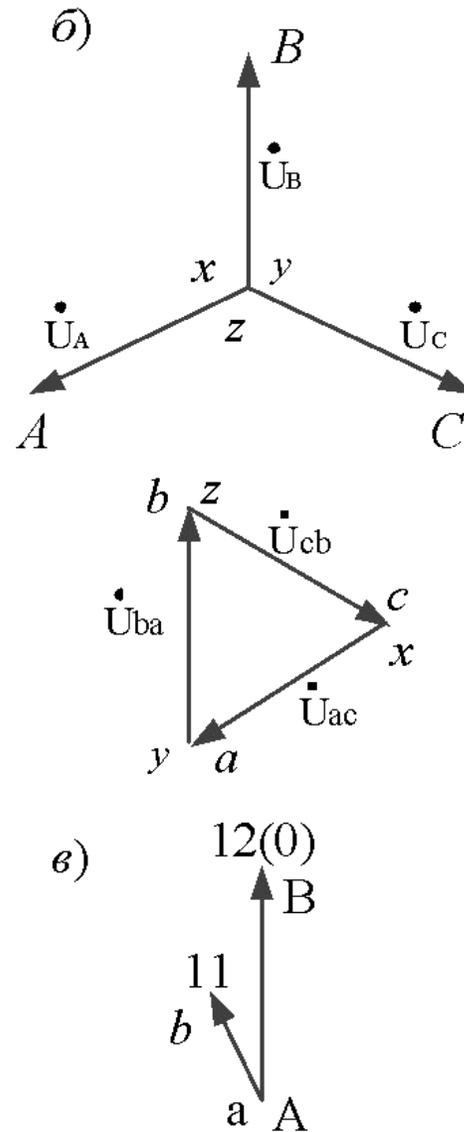
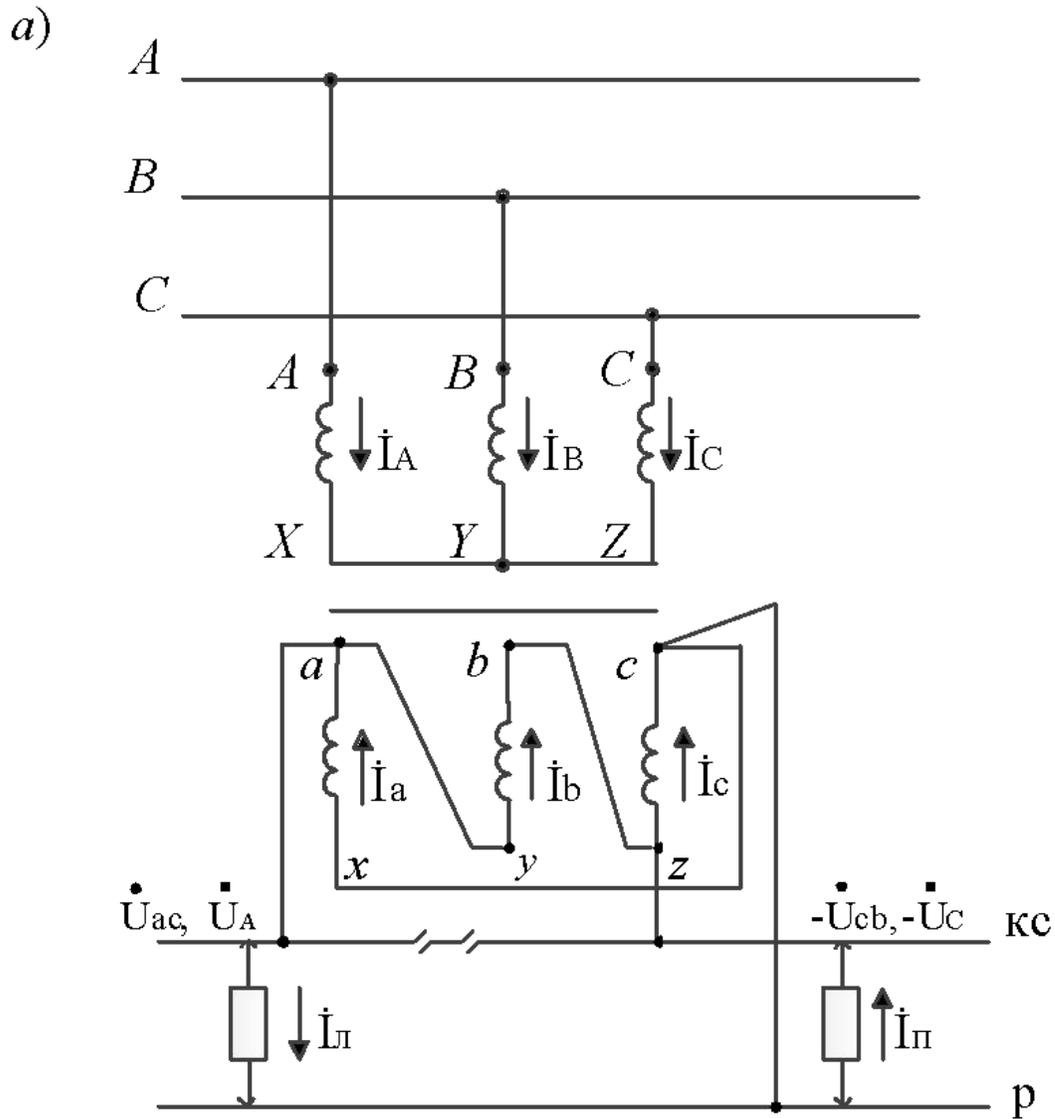
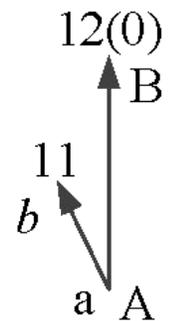


Схема питания тяговой сети стандартным трансформатором (а);

Векторные диаграммы напряжений первичной и вторичной обмоток (б);

Определение группы соединения обмоток (в).



Условный трёхфазный трансформатор, со схемой соединения обмоток (У/Д-11), используемый при дальнейшем изложении

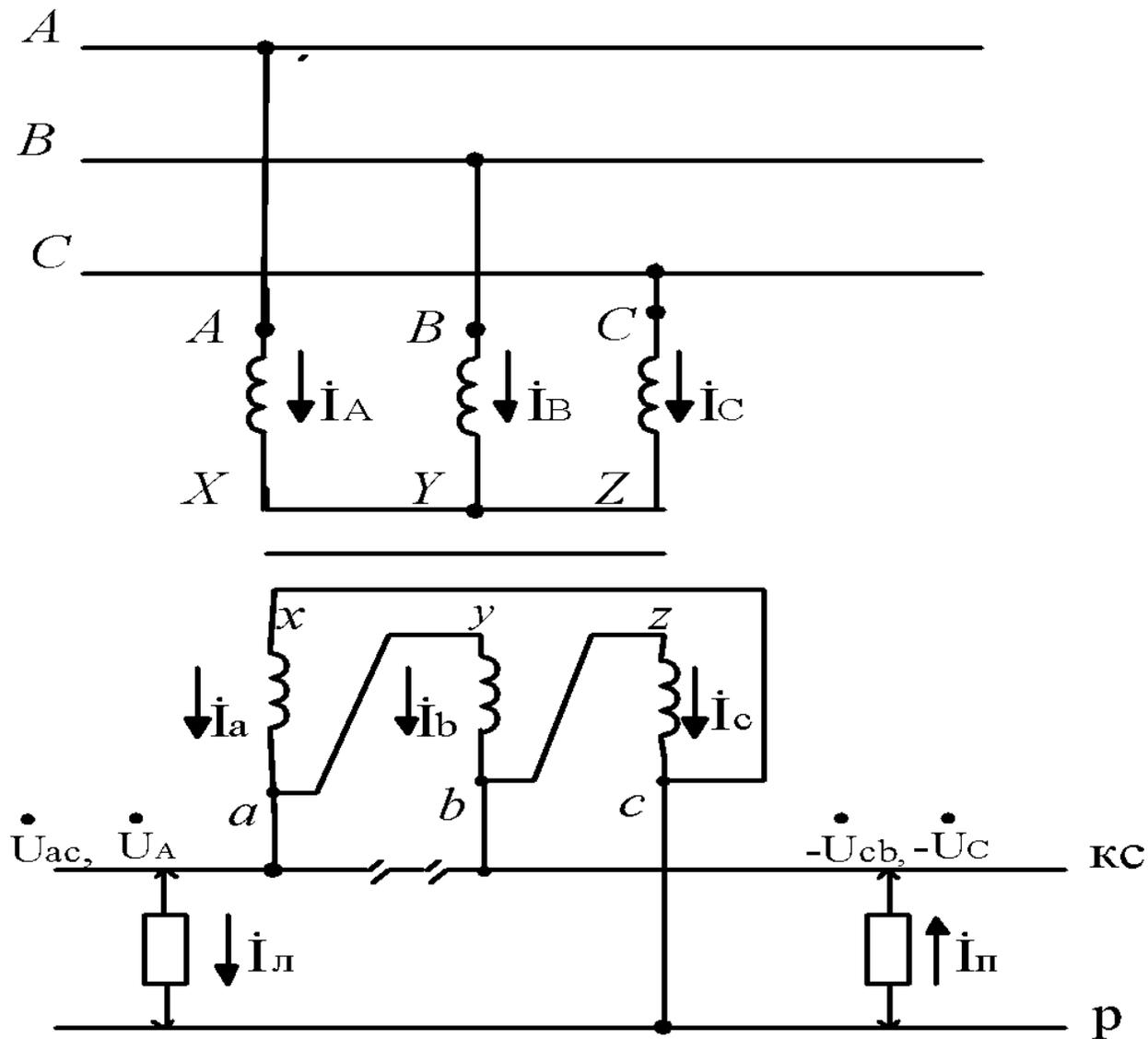
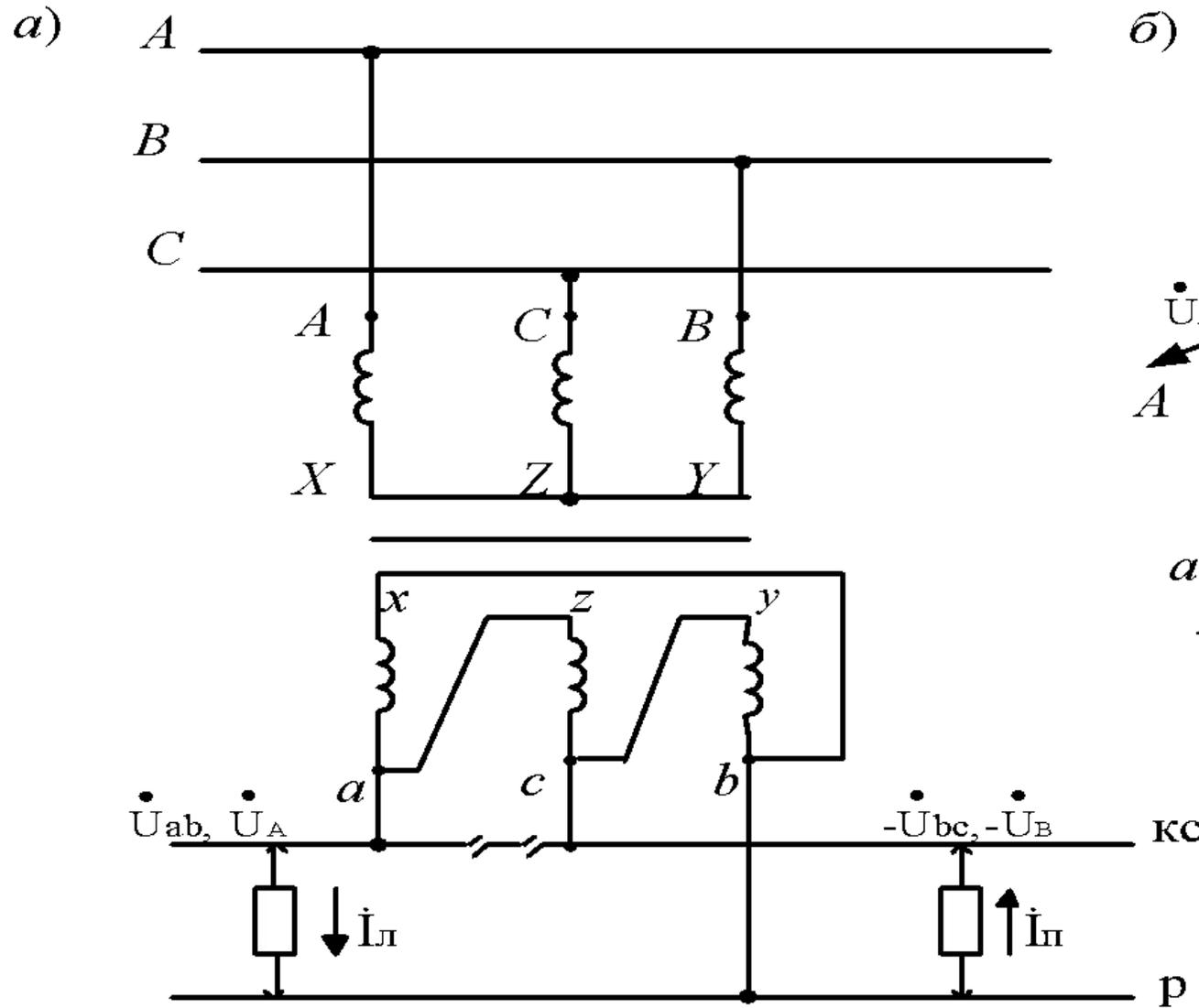
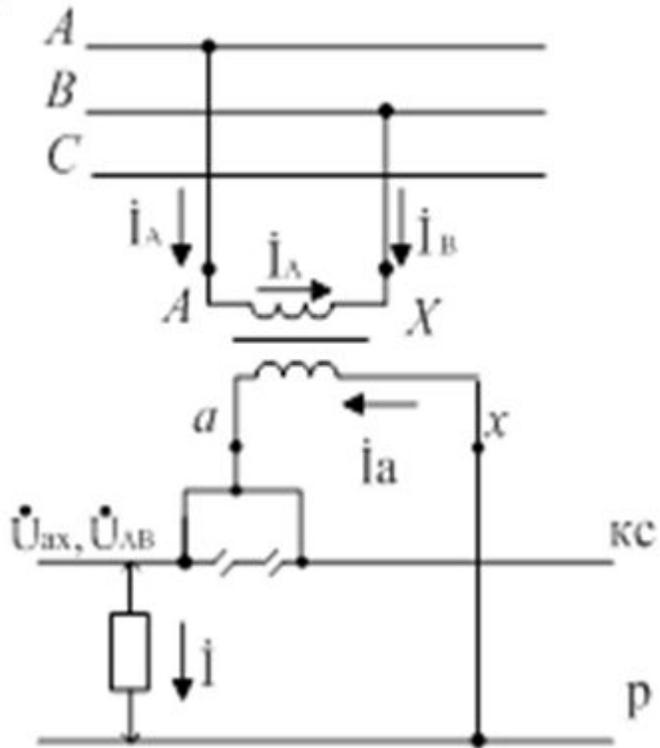


Схема питания тяговой сети трансформатором со схемой соединения обмоток У/Д-1 (а); векторные диаграммы напряжений первичной и вторичной обмоток (б)

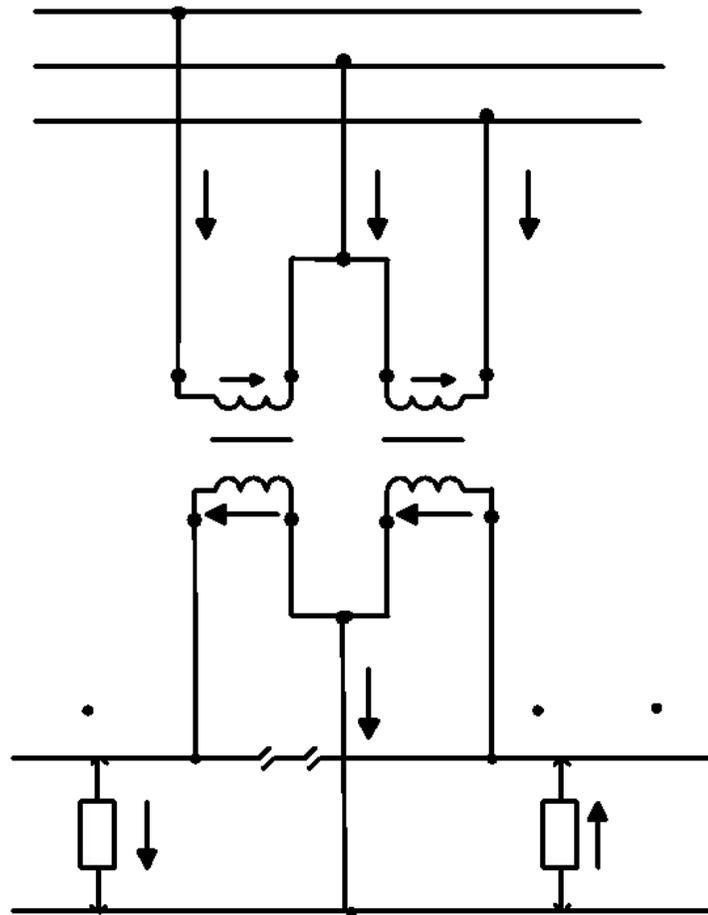


2. Однофазные трансформаторы

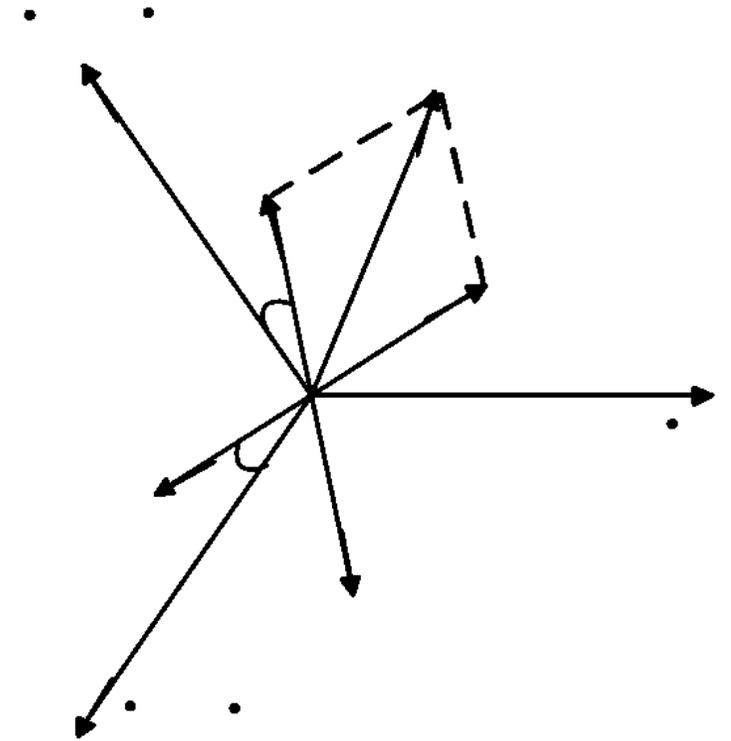
Схемы питания тяговой сети



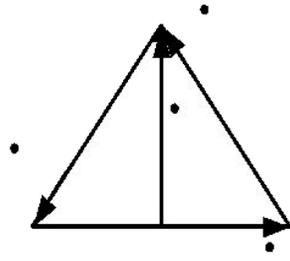
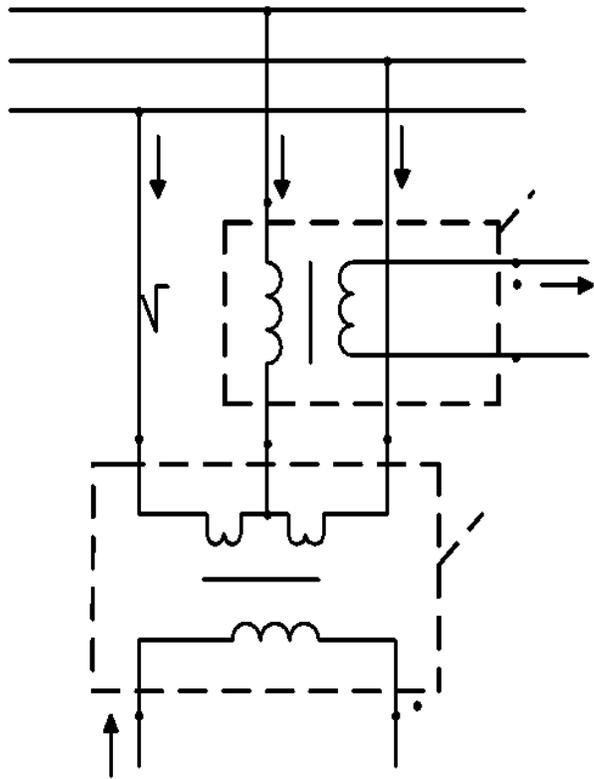
- одним трансформатором;



- с двумя однофазными трансформаторами соединенные в треугольник (а); векторная диаграмма токов (б).

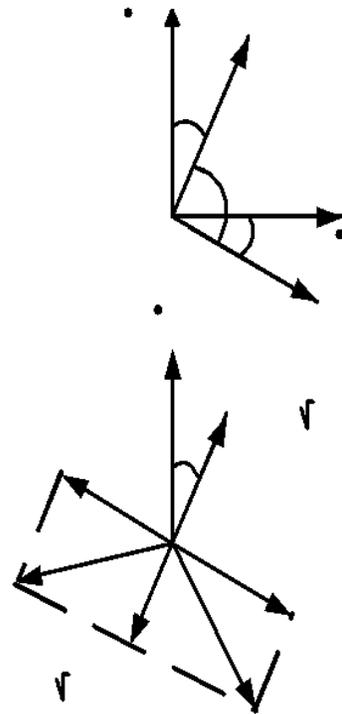


Питание тяговой сети по схеме Скотта (а), векторные диаграммы (б), (в) и (г)



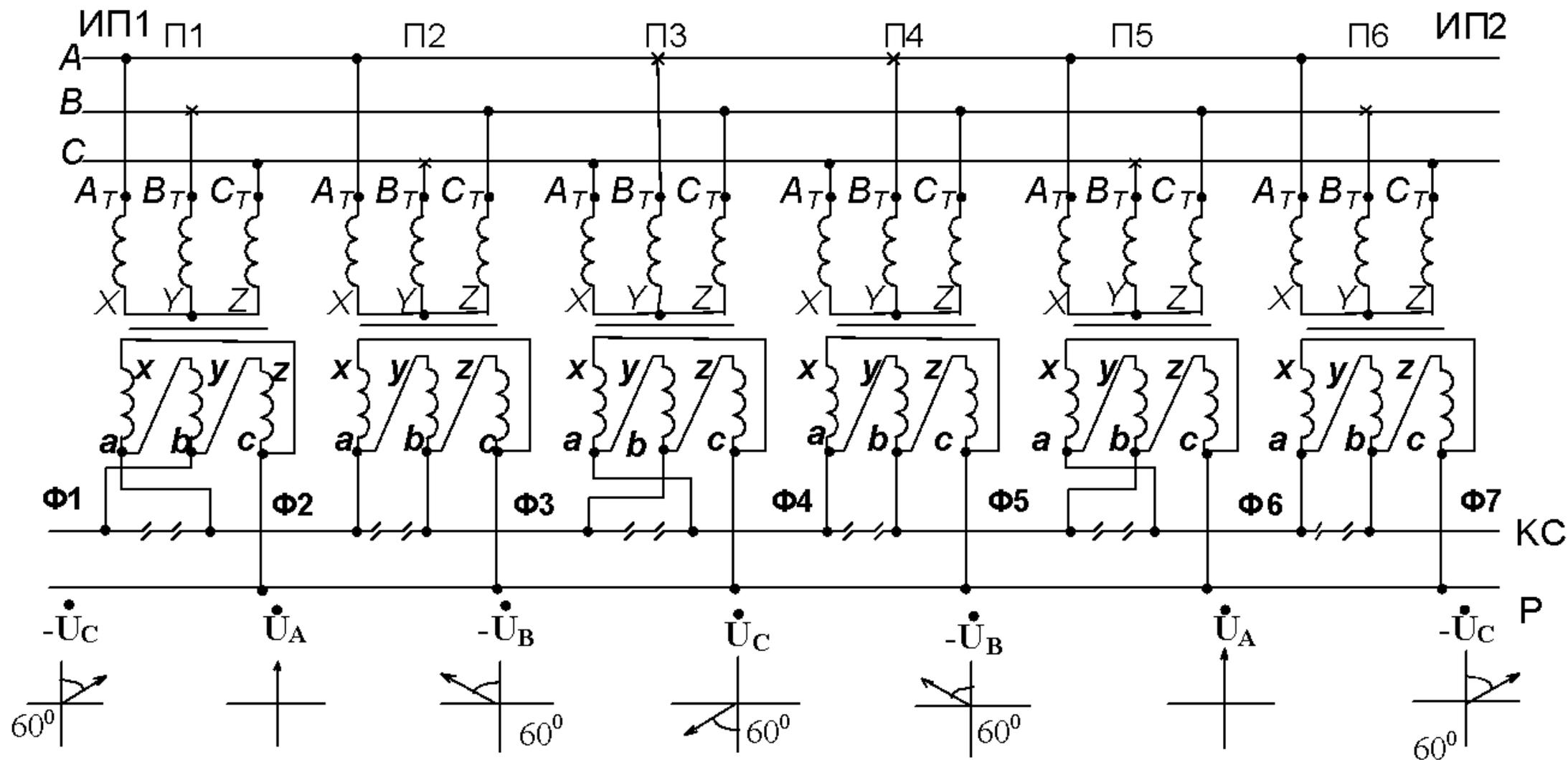
$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A \frac{\sqrt{3}}{2} W_1 - \dot{I}_\Pi W_2 &= 0; \\ \dot{I}_B (W_1/2) - \dot{I}_C (W_2/2) - \dot{I}_\Pi W_2 &= 0; \\ \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Решив систему, уравнений в частном случае когда $\dot{I}_\Pi = -j\dot{I}_\Pi$, имеем:



$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_\Pi (W_2/W_1); \\ \dot{I}_B &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_\Pi (W_2/W_1) - j\dot{I}_\Pi (W_2/W_1) = \dot{I}_A \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right); \\ \dot{I}_C &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_\Pi (W_2/W_1) + j\dot{I}_\Pi (W_2/W_1) = \dot{I}_A \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right). \end{aligned} \right\}$$

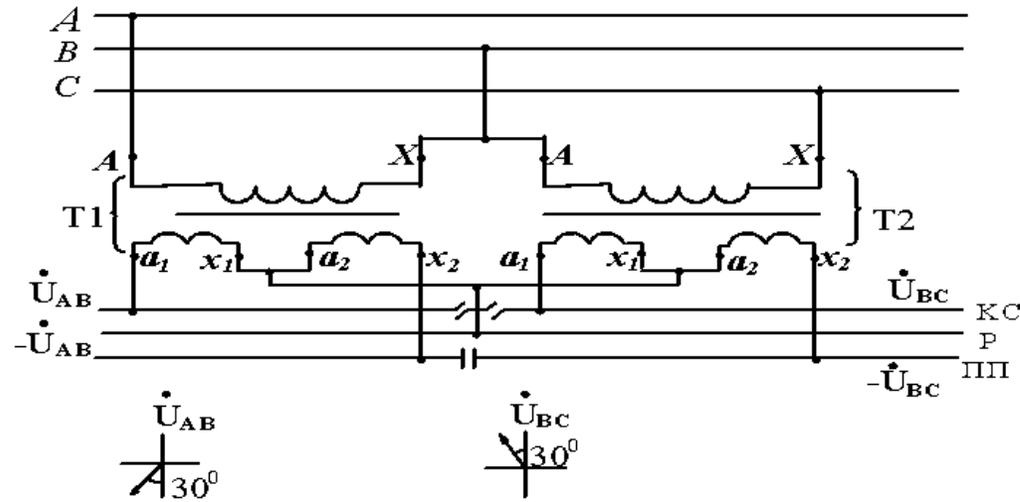
Схема фазировки стандартных трехфазных трансформаторов при двустороннем питании линии передачи



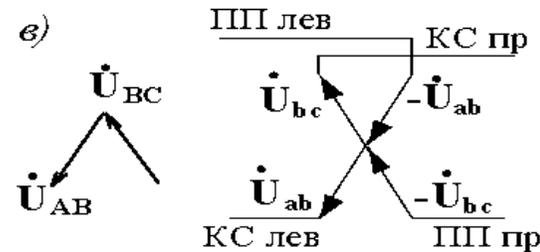
Схемы соединения обмоток трансформаторов в системе 2х25 кВ

3. Однофазные трансформаторы соединенные в открытый треугольник

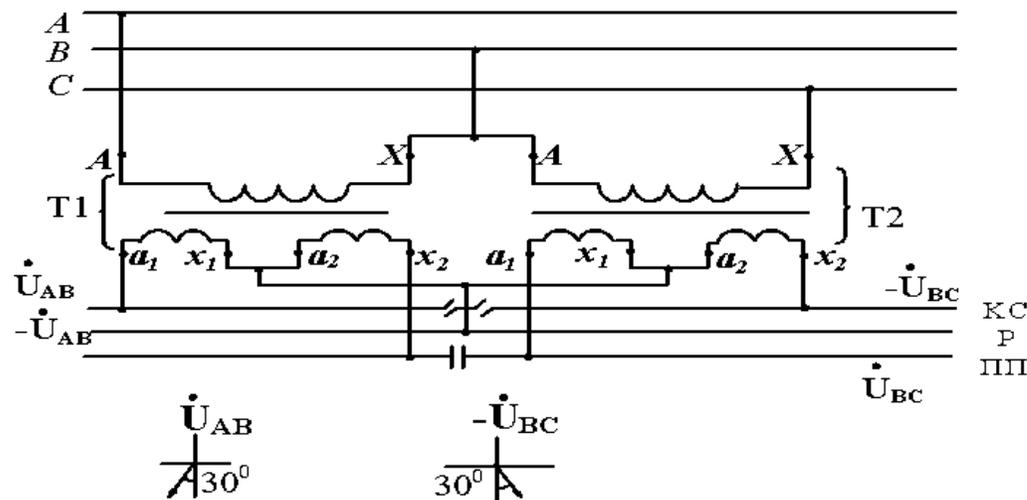
а)



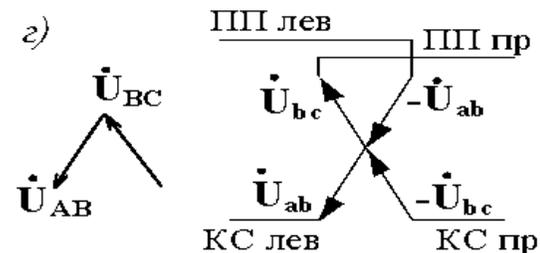
в)



б)



г)



Варианты подключения (а и б), векторные диаграммы первичных и вторичных напряжений (в и г)

4. Трехфазные трансформаторы

Схема с трехфазным трансформатором с повышающими автотрансформаторами

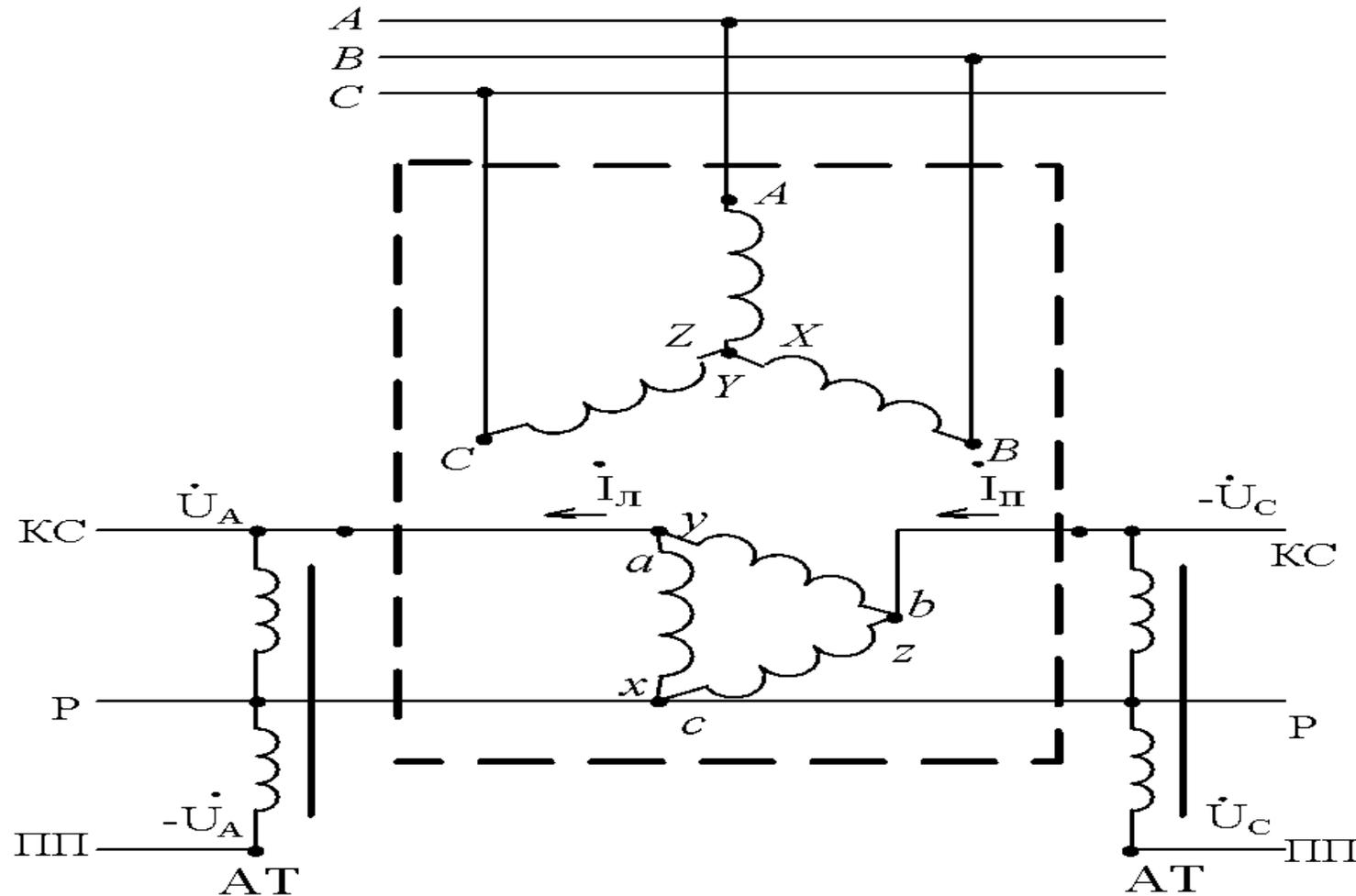


Схема при последовательном соединении двух фаз трехфазных трансформаторов (а), векторные диаграммы напряжений первичных и вторичных обмоток (б)

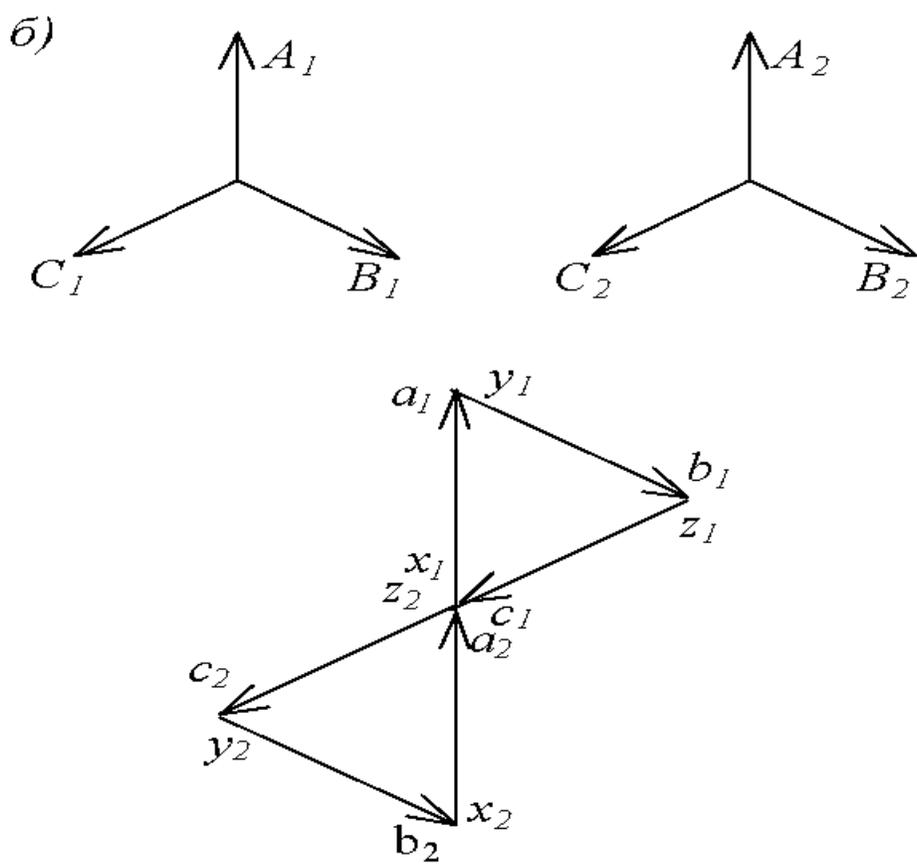
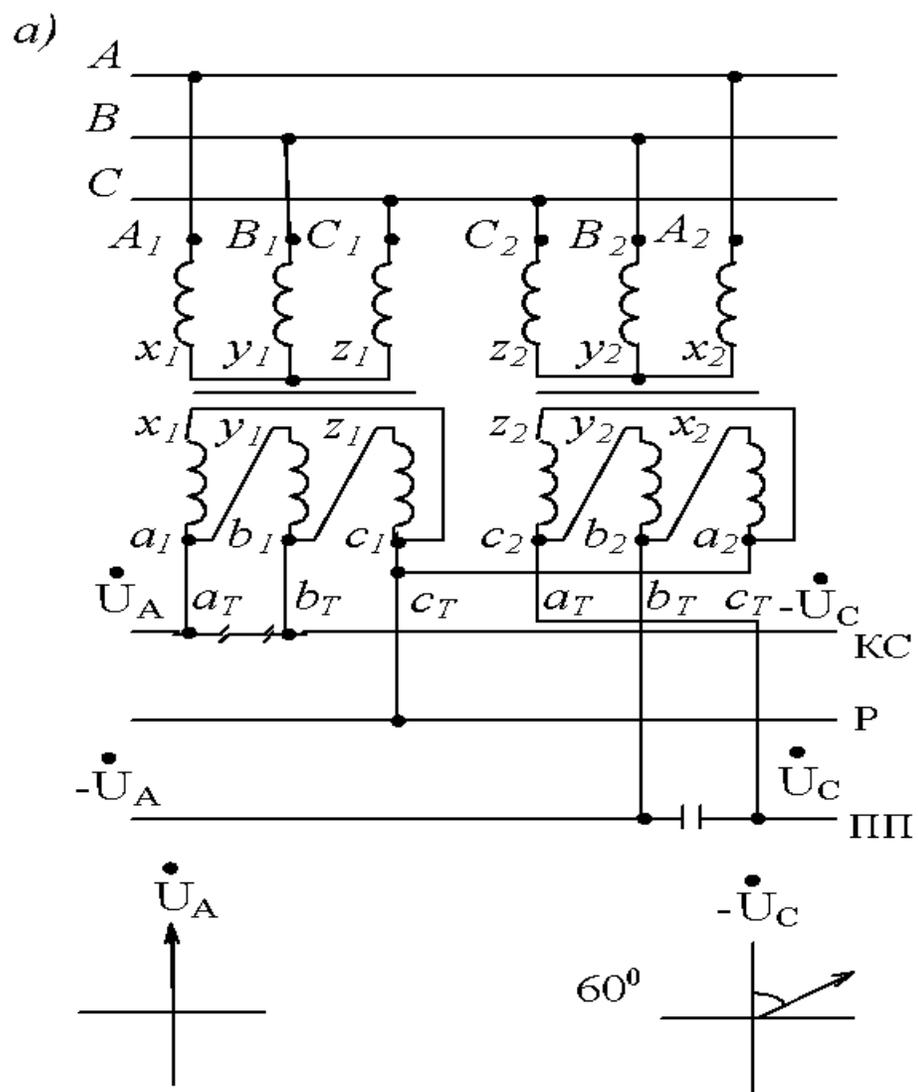
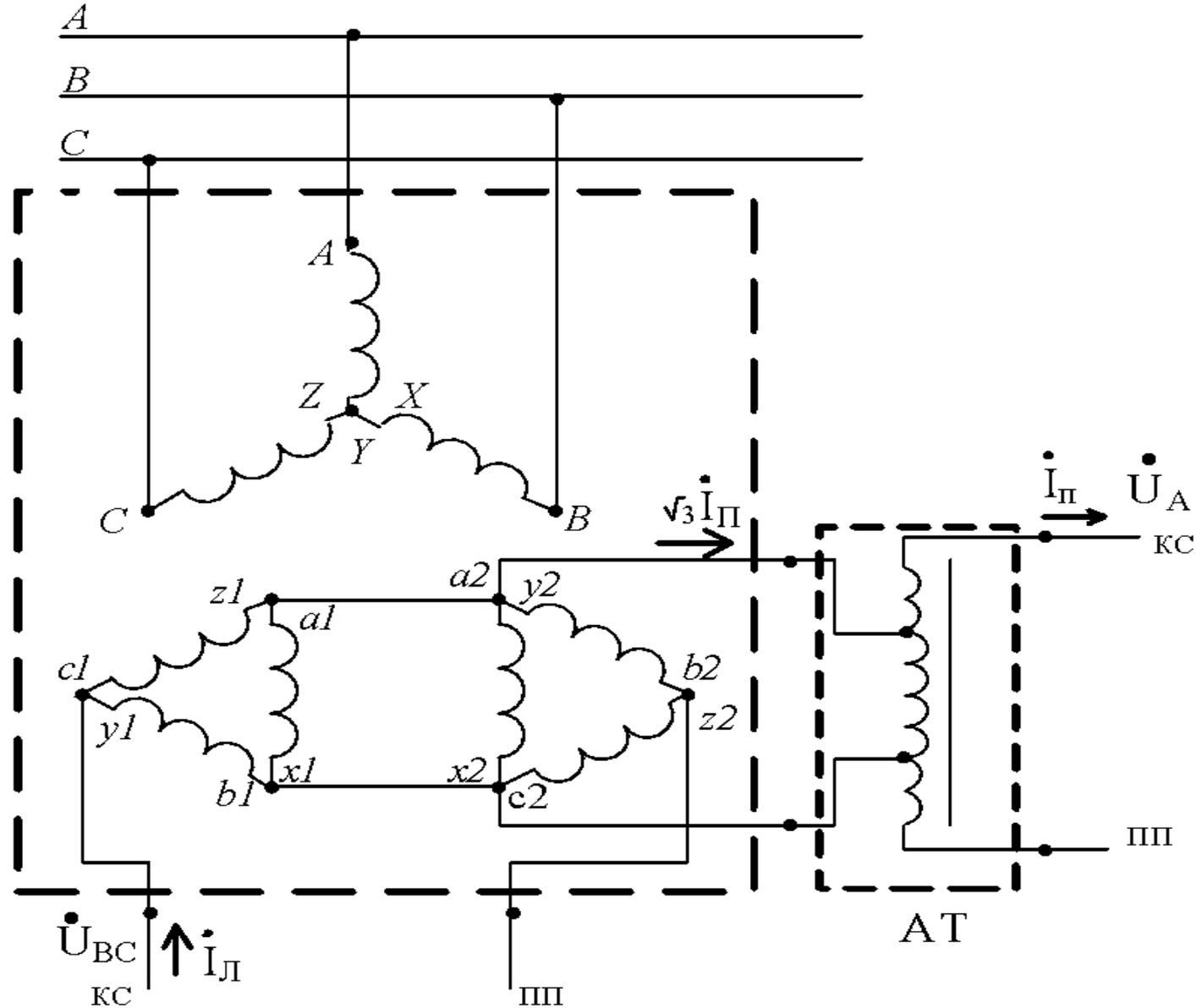
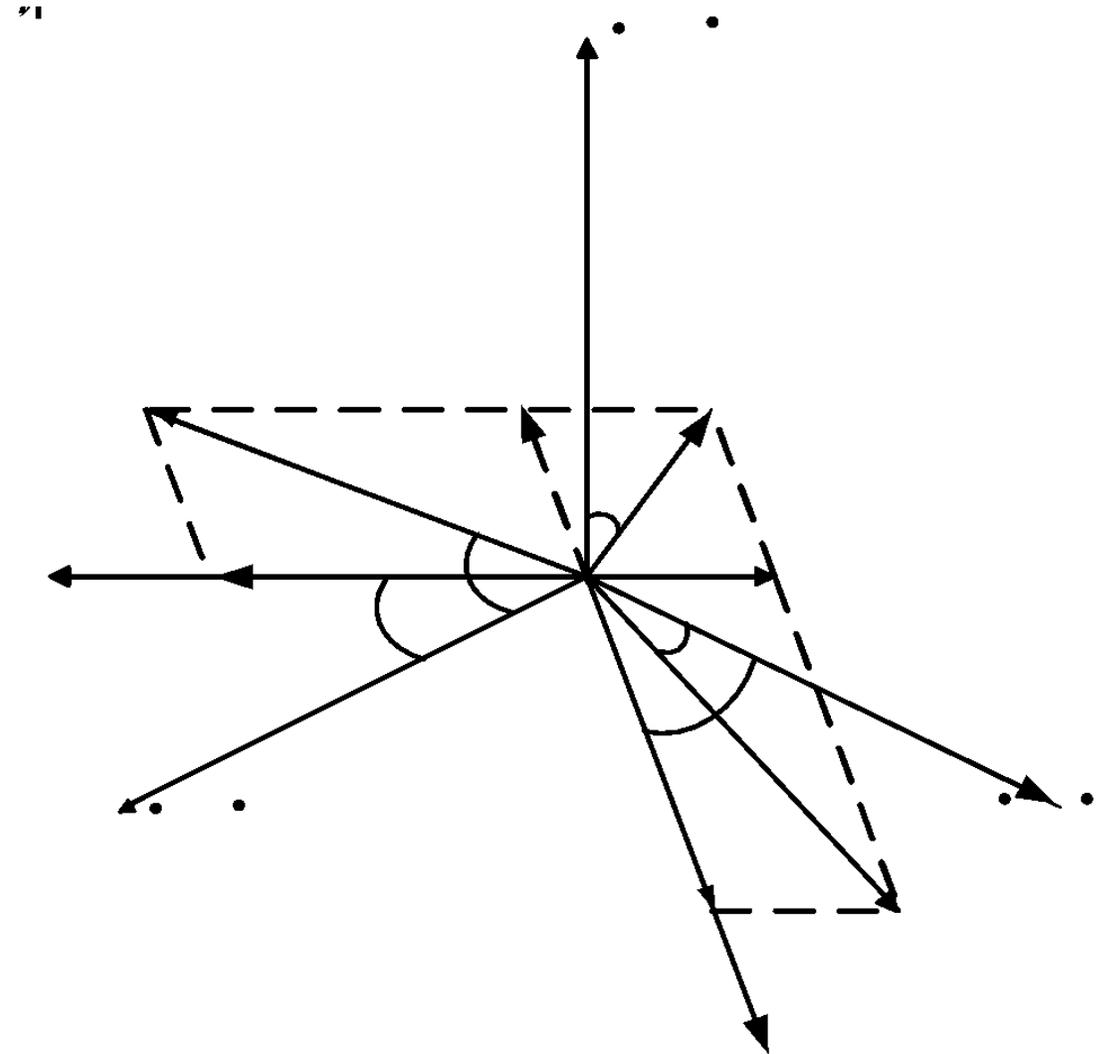
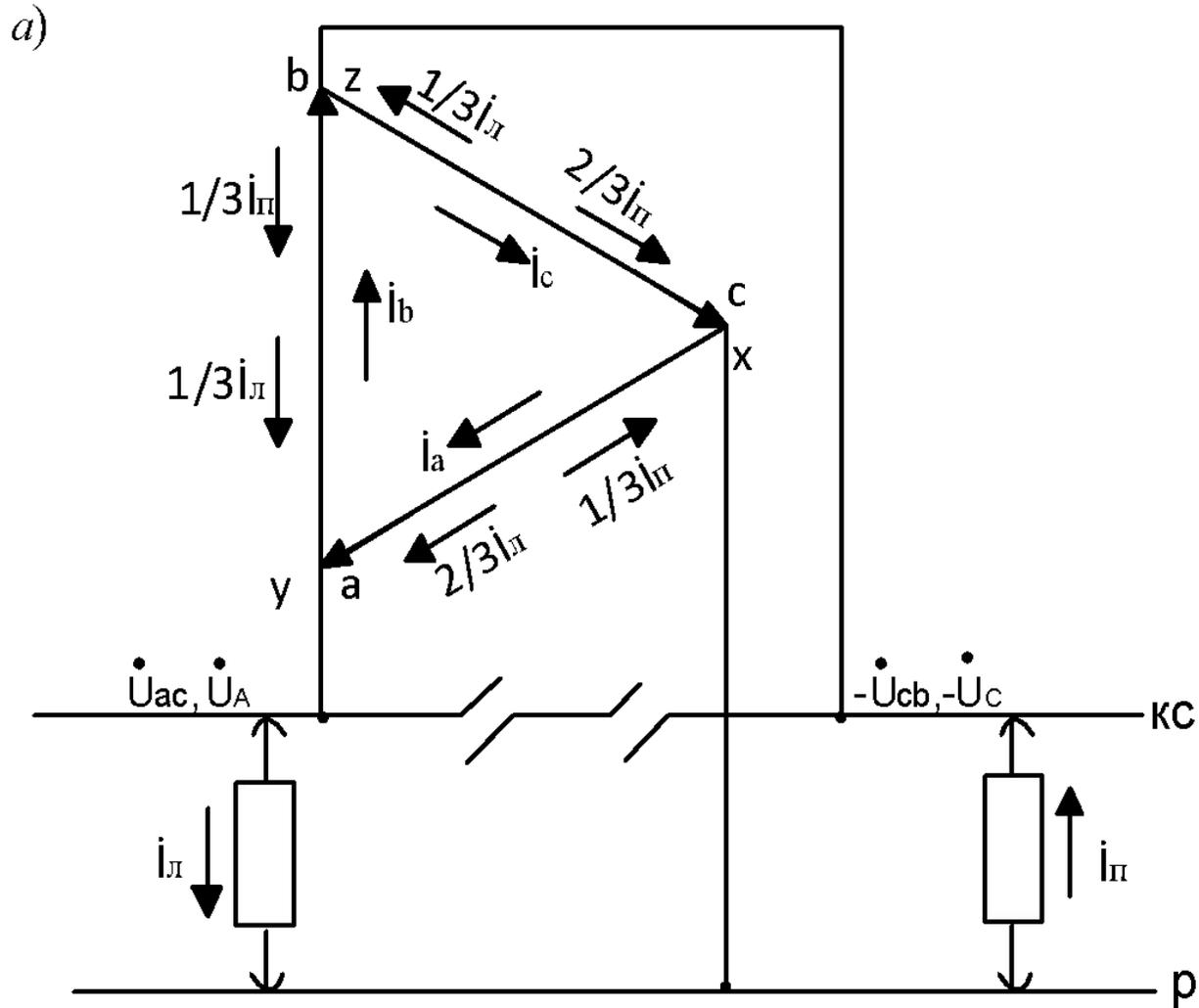


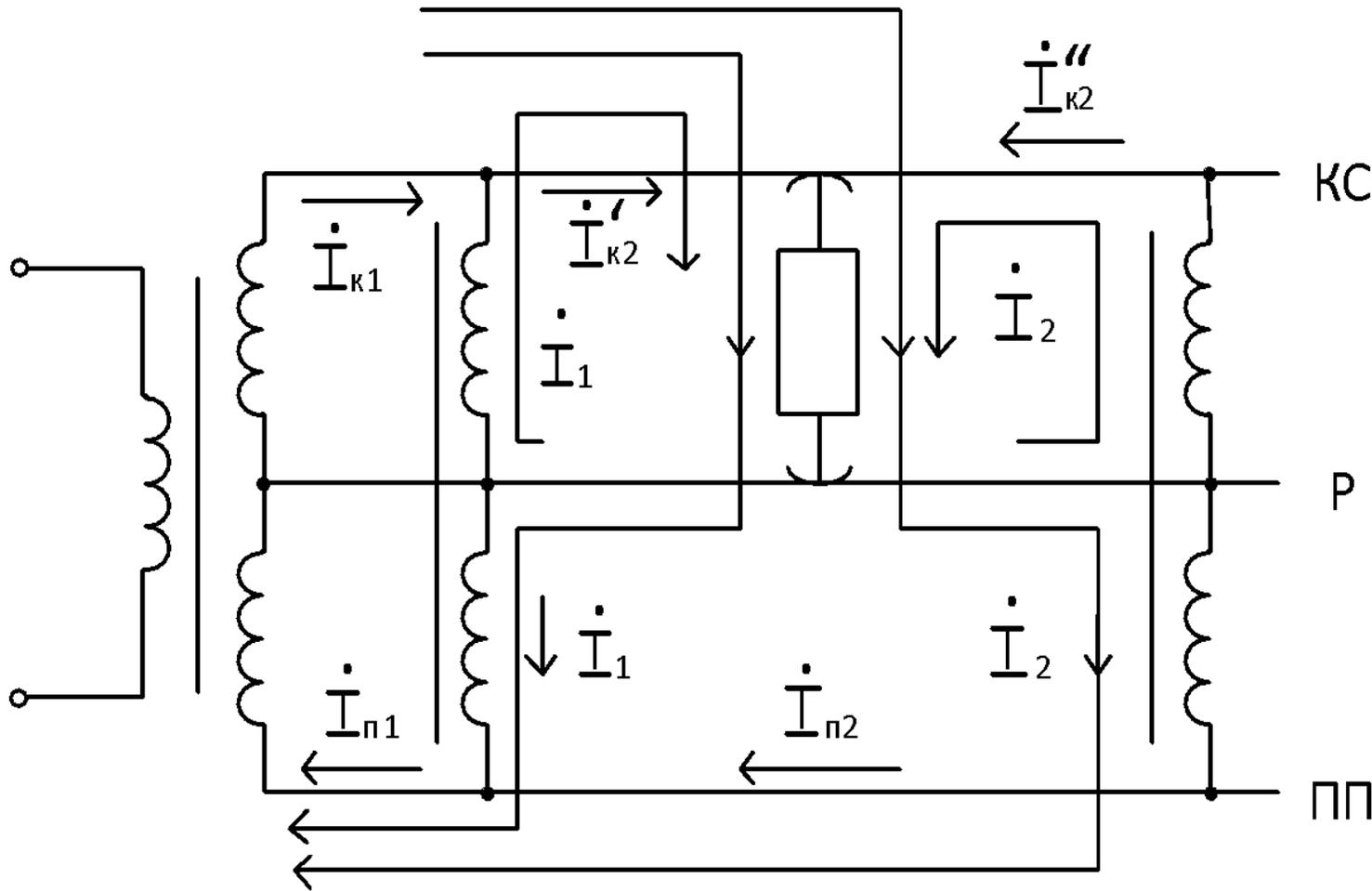
Схема Вудбриджа соединения обмоток трехфазного трансформатора с повышающим автотрансформатором



Распределение токов плеч питания по фазам трансформатора (а) и векторная диаграмма токов (б)



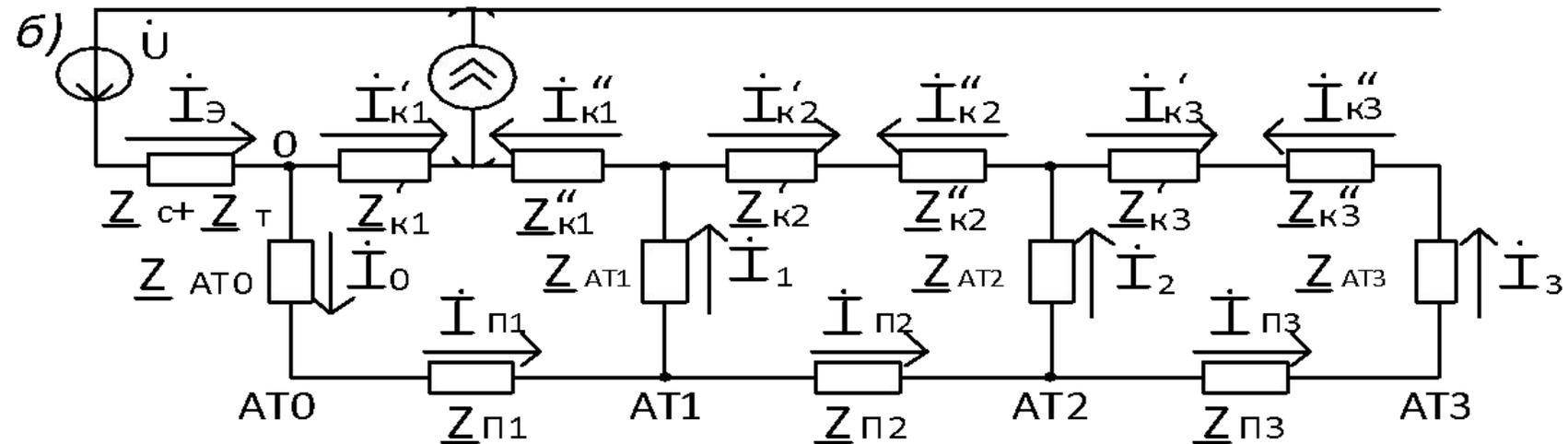
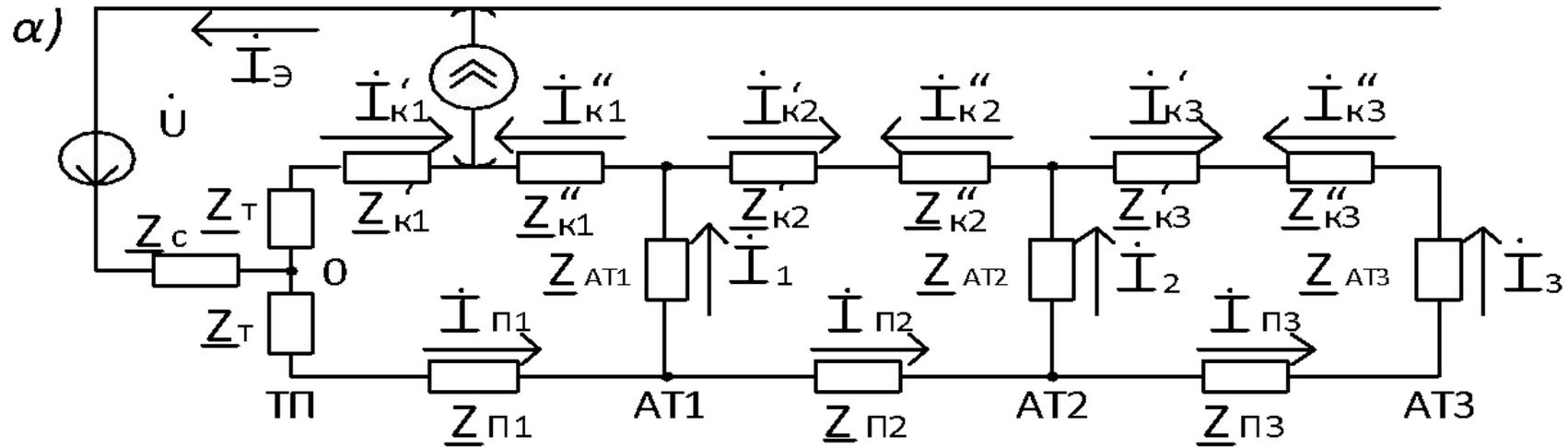
Трехпроводная система электроснабжения с автотрансформаторами



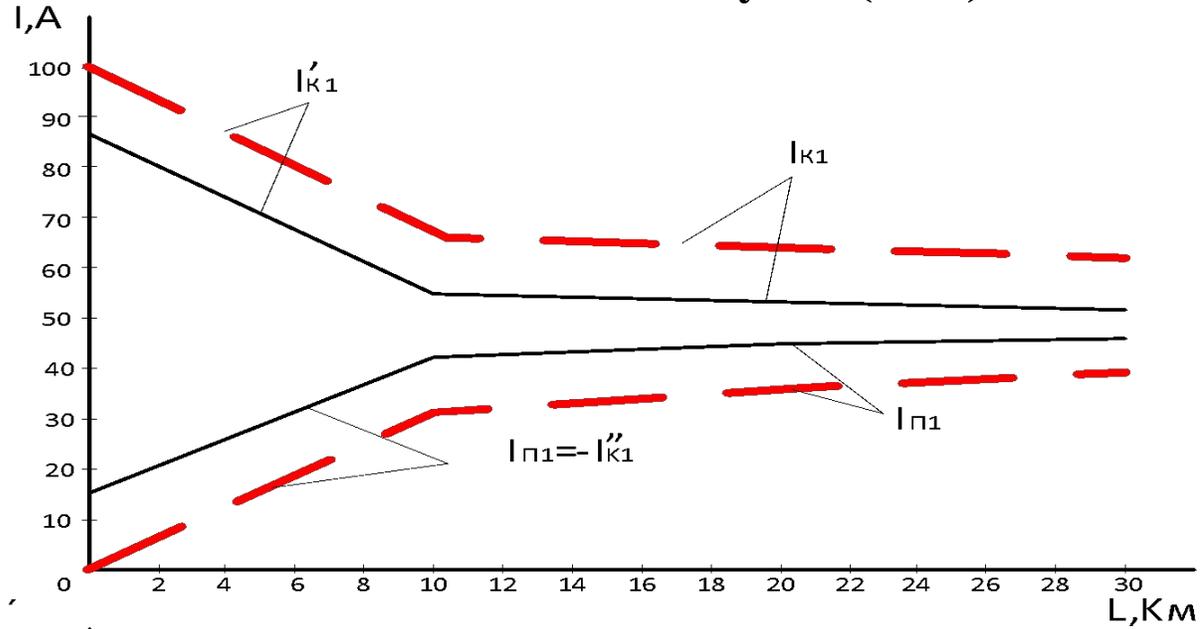
При этой системе на тяговых подстанциях с помощью специальных трансформаторов или дополнительных автотрансформаторов обеспечиваются два одинаковых или различных напряжения. Одно из них, соответствующее номинальному напряжению электроподвижного состава, подается между контактной сетью (КС) и рельсами, а второе – между рельсами и питающим проводом (ПП), подвешиваемым на опорах контактной сети. При этом напряжение между контактной сетью и питающим проводом равно сумме этих напряжений.

Для снижения напряжения между контактной сетью и питающим проводом до напряжения подвижного состава на фидерной зоне через 8-15 км устанавливают автотрансформаторы (АТ).

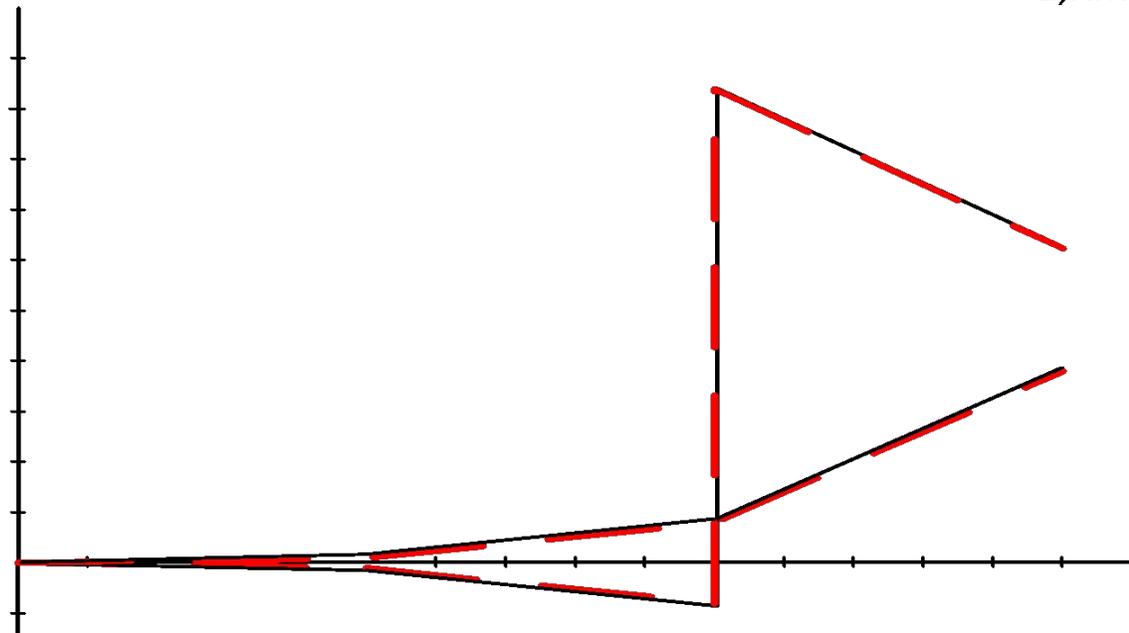
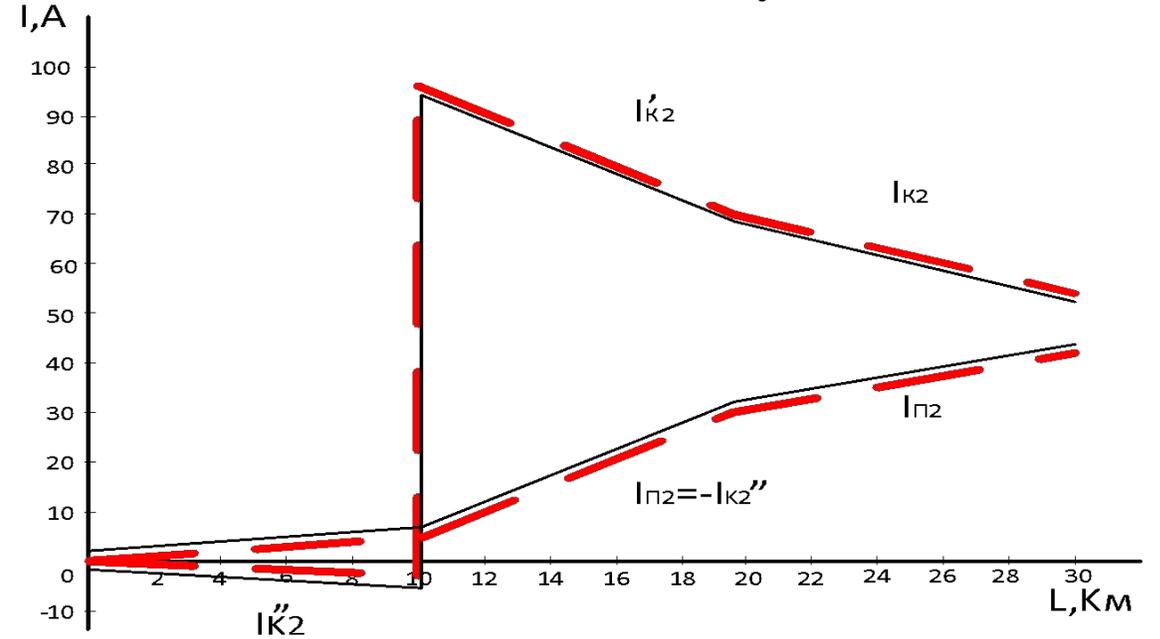
Схемы замещения для расчета токораспределения в системе 2х25 кВ на однопутной линии



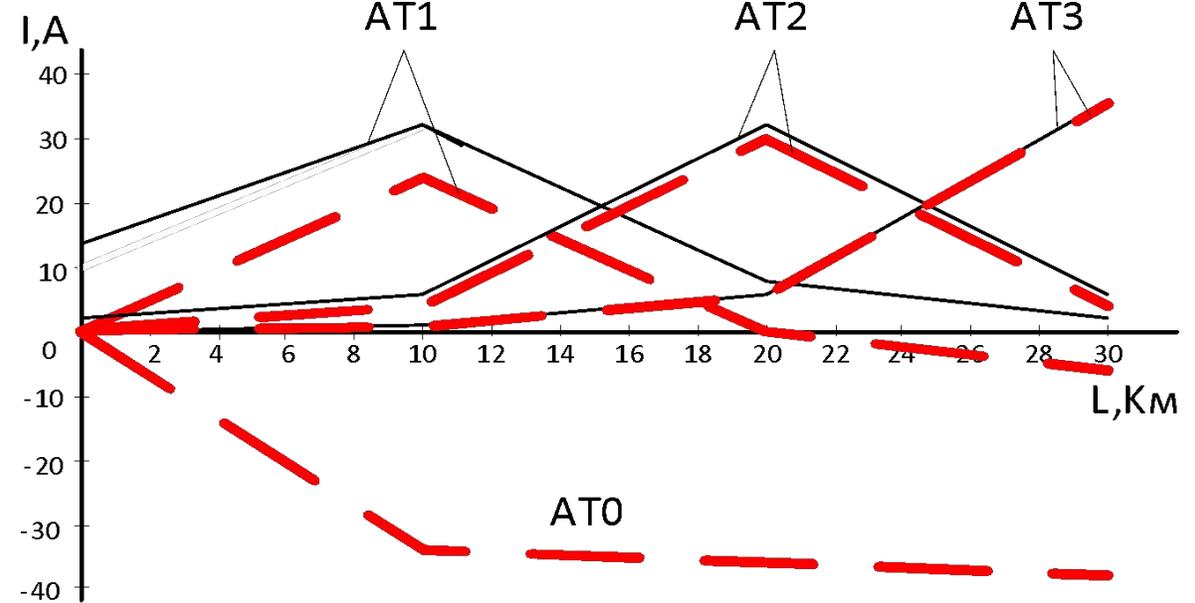
Токи в КС и ПП между ТП(АТ0) и АТ1



Токи в КС и ПП между АТ1 и АТ2

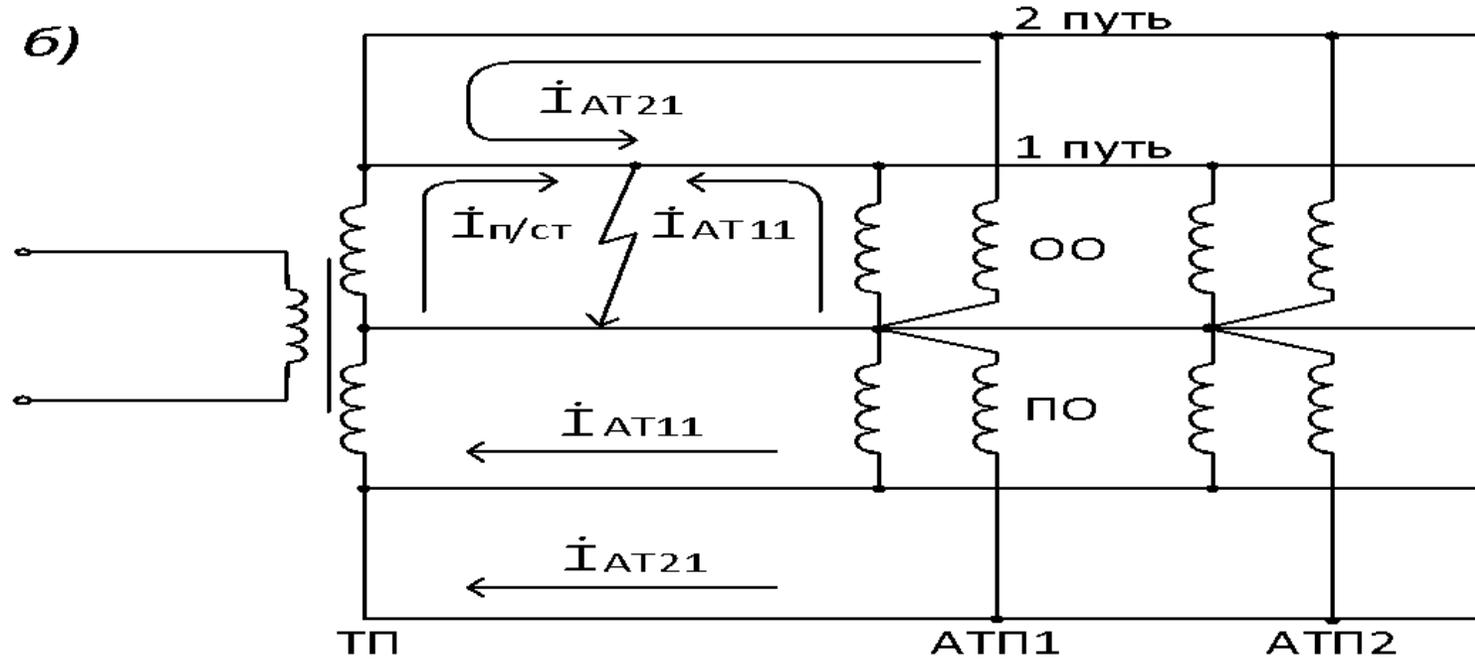
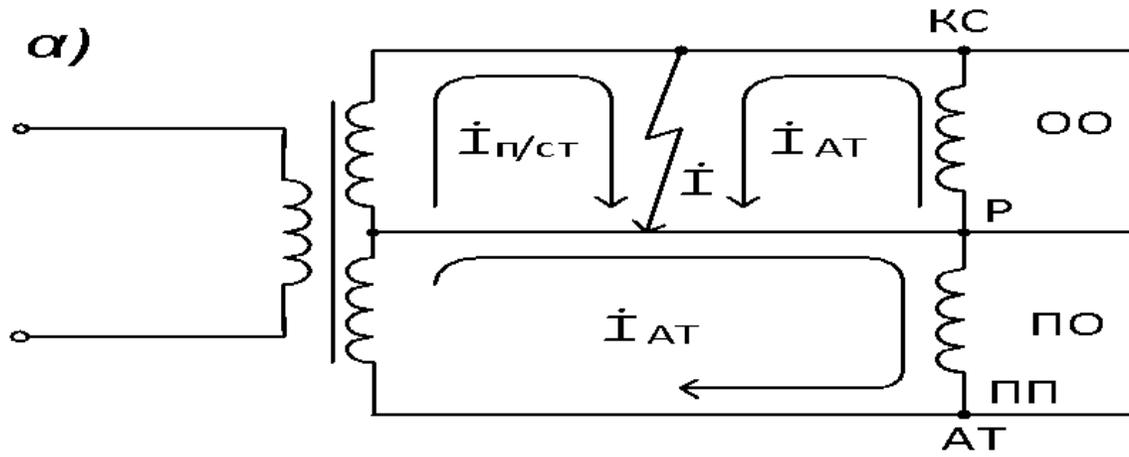


Токи в КС и ПП между АТ2 и АТ3



Нагрузка автотрансформаторов

Токораспределение в системе 2x25 кВ



Напряжение в контактной сети при проходе одного поезда по фидерной зоне с двусторонним питанием

