

6
Д-25

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ОМСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А. М. САПЕЛЬЧЕНКО

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ И СИММЕТРИРОВАНИЕ
НАГРУЗОК В ЛЭП, ПИТАЮЩИХ ЭЛЕКТРОТЯГУ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:

кандидат технических наук доцент
М. Г. ШАЛИМОВ,

кандидат технических наук доцент
В. Г. АВВАКУМОВ.

ОМСК — 1967

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ОМСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А. М. САПЕЛЬЧЕНКО

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ И СИММЕТРИРОВАНИЕ
НАГРУЗОК В ЛЭП, ПИТАЮЩИХ ЭЛЕКТРОТЯГУ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:
кандидат технических наук доцент
М. Г. ШАЛИМОВ,
кандидат технических наук доцент
В. Г. АВВАКУМОВ.

ОМСК — 1967

425

Работа выполнена в Омском институте инженеров железнодорожного транспорта на кафедре «Энергоснабжение электрических железных дорог».

Официальные оппоненты:
доктор технических наук
профессор

Бамдас А. М.

кандидат технических наук
доцент

Лисунов В. Н.

Ведущее предприятие — Служба электрификации и энергетического хозяйства Восточно-Сибирской железной дороги.

308910

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Киргизской ССР

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

Совет по присуждению ученой степени кандидата технических наук при Омском институте инженеров железнодорожного транспорта.
г. Омск, проспект Маркса, 35, телефон 3-42-13

Куда _____

Кому _____

Направляется Вам для ознакомления автореферат работы аспиранта Сапельченко А. М. на тему: «Компенсация реактивной мощности и симметрирование нагрузок в ЛЭП, питающих электротягу переменного тока», представленной в качестве диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита состоится «22» . . . *декабря* . . . 1967 г. в . . . *10* . час . . . *00* . мин в актовом зале института на заседании совета по присуждению ученой степени кандидата технических наук при Омском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Просим принять участие в работе совета или прислать свои отзывы.

«*21*» . . . *ноября* 1967 г.

Ученый секретарь совета доцент Е. Е. ГОЛИКОВ.

ВВЕДЕНИЕ

В нашей стране проводится коренная реконструкция железнодорожного транспорта на основе всеобщей электрификации. В последние годы при электрификации железных дорог преимущественное распространение получает система переменного тока промышленной частоты.

Широкое внедрение электрической тяги переменного тока, обусловленное ее высокими технико-экономическими и эксплуатационными показателями, приводит к появлению ряда нежелательных явлений в питающей энергосистеме. Так, потребляемые от питающих систем токи несимметричны вследствие однофазного отбора мощности от трехфазных линий электропередач и содержат значительную реактивную составляющую; кроме того, питающая система загружается высшими гармоническими токами из-за применения выпрямительных электровозов. Эти токи создают соответствующие падения напряжения в сети, в результате чего имеют место несимметрия и искажение формы кривой напряжения.

Несимметричная и несинусоидальная электротяговая нагрузка ухудшает работу практически всех элементов питающей энергосистемы, вызывая снижение располагаемой мощности и увеличивая потери энергии в них.

Большая доля реактивной составляющей в общем количестве энергии, потребляемой электровозами переменного тока, приводит к очень низким значениям естественного коэффициента мощности на шинах питающих тяговых подстанций (0,65—0,85).

Для исправления отмеченных недостатков в системах энергоснабжения железных дорог широко применяются циклическая фазировка подстанций и искусственная компенсация реактивной мощности. К сожалению, в силу целого ряда причин эти технические средства не могут обеспечить необходимых симметрирования и повышения коэффициента мощности тяговой нагрузки. Поэтому актуальными

являются задачи изыскания и исследования дополнительных способов компенсации реактивной мощности и снижения несимметрии токов и напряжений, вызываемых электротяговой нагрузкой.

В связи с соображениями, изложенными выше, цель реферируемой работы состоит в том, чтобы на основе анализа типовых однофазных устройств параллельной компенсации реактивной мощности (УПК), установленных на тяговых подстанциях переменного тока: а) разработать и исследовать другие схемы установок параллельной компенсации с более широкими возможностями, в частности трехфазную несимметричную УПК; б) дать рекомендации для проектирования предлагаемых в работе трехфазных несимметричных установок параллельной компенсации; в) провести необходимые экономические обоснования целесообразности внедрения подобных устройств.

Решение этих задач потребовало проведения теоретических разработок и экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях. Для обработки полученных материалов широко использовалась ЭЦВМ.

1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ВОПРОСОВ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И УМЕНЬШЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ

Проблемой компенсации реактивной мощности занимался широкий круг исследователей. Значительный вклад в разработку отдельных вопросов этой проблемы внесли работы отечественных ученых: Н. А. Мельникова, Д. В. Тимофеева, Г. М. Каялова, С. В. Усова, А. К. Черновца, Б. А. Полякова, Л. В. Литвака, Б. С. Мешеля, А. А. Тайца, А. К. Шидловского и ряда др.

Вопросы повышения экономичности работы ЛЭП и систем в целом при помощи установок параллельной и продольной компенсации рассмотрены в работах зарубежных специалистов, таких как Гендерсон, Симмонс, Тайс, Томпсон, Биглоу, С. R. Shulze, W. A. Klein, S. A. Mallard, J. R. Rankin, V. N. Rikh и др.

Несмотря на достигнутые успехи в повышении коэффициента мощности энергетических систем, актуальность

проблемы повышения энергетических показателей не только не уменьшилась, но даже возросла. Это объясняется огромными масштабами электрификации народного хозяйства, а также появлением специфических несимметричных нагрузок — главным образом, однофазных тяговых, в применении к которым традиционные решения оказываются зачастую недостаточно эффективными.

Исследованиям по улучшению энергетических показателей системы энергоснабжения электрифицированных железных дорог посвящены работы Р. И. Караева, Б. Н. Тихменева, Б. Я. Гохштейна, Д. В. Тимофеева, А. И. Тамазова, Б. М. Бородулина, Б. А. Метелкина, В. А. Коршунова, Н. С. Крайчика, А. М. Пинцова и др.

Теоретические расчеты и опыт эксплуатации показали, что несимметрия токов в ЛЭП, питающих электротягу, весьма значительна, а мероприятия, направленные на симметрирование тяговой нагрузки, не всегда приносят ожидаемый эффект. К таким мероприятиям относится искусственное чередование тяговой нагрузки по фазам питающей линии соответствующим изменением фазировки присоединения тяговых трансформаторов подстанций к ЛЭП и тяговой сети. Симметрирование токов при помощи фазировки из-за неравенства нагрузки отдельных подстанций, непрерывного изменения токов фаз подстанций по величине, всегда имеющейся частичной несимметрии в ЛЭП между подстанциями и ряда других причин не дает значительного эффекта.

Продольная компенсация, являясь идеальным способом улучшения режима напряжения в системе электроснабжения тяги, не приводит к значительному повышению коэффициента мощности. Кроме того, низкое использование установленной мощности конденсаторных батарей, резкое увеличение уравнительных токов, появление субгармонических колебаний вызывают большие затруднения по применению подобных устройств.

Улучшения энергетических характеристик можно достичь с помощью параллельной емкостной компенсации, но применяемая в настоящее время типовая нерегулируемая однофазная установка параллельной компенсации реактивной мощности, как показали исследования и эксплуатация, дает существенный положительный эффект только в весьма ограниченном диапазоне изменения нагрузок в плечах питания подстанции.

Необходимо отметить, что применяемый в настоящее время показатель качественной стороны работы трехфазной несимметричной цепи — величина средневзвешенного коэффициента мощности, затрудняет определение эффективности тех или иных мероприятий, способствующих улучшению энергетических показателей питающей системы. В условиях, характерных для электрической тяги, сами понятия «коэффициент мощности» и «кажущаяся мощность» не идентичны тем, которыми пользуются в однофазных и трехфазных симметрично загруженных цепях. Анализ показывает, что для подобных цепей вряд ли удастся создать такой всеобъемлющий показатель, каким является для однофазной системы коэффициент мощности. Величина средневзвешенного коэффициента мощности не отражает действительного режима цепи и может привести к ложным выводам о качественной стороне ее работы. Поэтому мероприятия, которые основаны на достижении нормированной величины значений коэффициента мощности плеча питания подстанции, могут не только не улучшить энергетические показатели, но даже в отдельные моменты привести к их снижению.

В режиме несимметричной нагрузки потери мощности и напряжения в каждой фазе в общем случае будут различные. Их величины, а также степень использования генераторов, трансформаторов, сетей зависят не только от амплитудной, но и от фазовой несимметрии токов. Наряду с этим на все качественные показатели режима работы цепи значительное влияние оказывают гармоники тока и напряжений. Более полно характеризуют несимметричную несинусоидальную тяговую нагрузку следующие показатели, рассматриваемые совместно: фазовые значения $\cos \varphi$ основной частоты, коэффициент несимметрии активной нагрузки и степень искажения формы кривых тока и напряжений.

В реферируемой работе показано, что величина потерь мощности косвенным образом включает в себя все возможные стороны ухудшения режима, связанного как с гармоническим составом тока и напряжений или несимметрией нагрузки, так и со значительными потоками реактивной мощности. На основании этого в диссертационной работе в качестве критерия для оценки эффективности работы различных установок параллельной компенсации принят метод относительных приростов потерь мощности.

2. ОДНОФАЗНОЕ УСТРОЙСТВО ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Для повышения коэффициента мощности на тяговых подстанциях переменного тока в настоящее время применяются устройства параллельной компенсации, включаемые на «отстающее» плечо питания. При проектировании предполагалось, что подобные установки наряду с компенсацией реактивной мощности в значительной мере будут решать вопросы симметрирования нагрузки и демпфирования высших гармонических в тяговой сети.

Схема подсоединения установок параллельной компенсации и критерии, по которым выбирается мощность УПК, не лишены существенных недостатков. Так, расчет необходимой общей реактивной мощности ведется, исходя из повышения значений средневзвешенного коэффициента мощности до нормированной величины. В среднем за некоторый период времени коэффициент мощности может быть в пределах нормированной величины, однако, это достигается за счет высоких его значений при малых нагрузках, в то время как в период максимальных нагрузок, когда наиболее важно поддерживать высокий коэффициент мощности, он оказывается неудовлетворительным; и в системе ощущается недостаток реактивной мощности. Поэтому следует рассматривать вопросы оптимальной компенсации реактивной мощности в максимальных и минимальных режимах работы подстанций.

Аналізу работы однофазной УПК в условиях резкопеременной тяговой нагрузки посвящено большое количество исследований, в которых обстоятельно разобраны достоинства и недостатки такой схемы включения емкостей. Выводы этих работ свидетельствуют о том, что нерегулируемая УПК может приносить значительный эффект лишь в частных случаях, при определенных сочетаниях тяговой нагрузки. В некоторых случаях нерегулируемая поперечная емкостная компенсация при резкопеременной нагрузке может не давать положительного эффекта, либо давать даже отрицательный результат.

В работе получены зависимости значений фазовых углов сдвига между токами и напряжениями от соотношения нагрузок в плечах питания и величины компенсационного тока:

$$\varphi_{A_K} = \arcsin \frac{I_{1H}}{3I_{A_K}} \sin \left(\frac{2\pi}{3} - \varphi_{1H} \right) - \arctg \frac{I_K - I_{2H} \sin \varphi_{2H}}{I_{2H} \cos \varphi_{2H}}$$

$$\varphi_{B_K} = \varphi_{1H} - \frac{\pi}{3} + \arcsin \frac{\sqrt{I_K^2 + I_{2H}^2 - 2I_K I_{2H} \sin \varphi_{2H}}}{3I_{B_K}} \times \sin \left(\frac{\pi}{3} + \varphi_{1H} \right)$$

$$\varphi_{C_K} = \varphi_{1H} - \arcsin \frac{\sqrt{I_K^2 + I_{2H}^2 - 2I_K I_{2H} \sin \varphi_{2H}}}{3I_{C_K}} \times \sin \left(\frac{2\pi}{3} - \varphi_{1H} \right),$$

где

I_K — компенсационный ток;

I_{1H}, I_{2H} — токи плеч питания;

$\varphi_{1H}, \varphi_{2H}$ — соответствующие им угловые сдвиги.

Анализ этих выражений показывает, что в широком диапазоне изменения тяговой нагрузки не удается добиться хорошего положения с угловыми сдвигами токов в фазах питающей линии.

Ступенчатым и особенно плавным регулированием мощности однофазной УПК можно добиться значительно большего эффекта, чем при нерегулируемой установке, но и при этом в ряде случаев такая схема подключения емкостей не является самой рациональной. Постановка индуктивности последовательно с конденсаторами влечет за собой значительное увеличение высших гармонических в самом устройстве компенсации, что приводит к повышенному выходу из строя конденсаторов. В то же время анализ гармонического состава на стороне питающей ЛЭП показывает, что часто удовлетворительного подавления высших гармонических не происходит.

3. УСТРОЙСТВО ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ, ВКЛЮЧАЕМОЕ ПО СХЕМЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО ТРЕУГОЛЬНИКА РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Важность проблем, способствующих повышению качества электроэнергии, заставляет искать другие схемные ре-

шения, которые могли бы принести больший эффект, чем существующая типовая установка параллельной компенсации. В связи с этим предлагается использовать трехфазные несимметричные установки параллельной компенсации реактивной мощности. В работе показано, что такие устройства способны комплексно решать вопросы компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузки. Совместное выполнение этих задач предлагаемые установки могут выполнять в связи с возможностью регулирования в больших пределах величины компенсационного тока и результирующего углового сдвига его относительно своего вектора напряжения.

Для выявления характера изменения возможных значений линейных компенсационных токов и их угловых сдвигов относительно векторов фазных напряжений был разработан алгоритм и выполнен расчет на ЭЦВМ. Расчет велся в относительных единицах, при изменении фазовых компенсационных токов в пределах от 0 до 1. В результате получено, что для установок, составленных только на емкостных элементах, величина результирующего вектора в относительных единицах изменяется от 0 до 1,73, а углы его поворота от фазового напряжения в пределах от $+60^\circ$ до $+120^\circ$. Соответственно — для индуктивно-емкостных устройств от 0 до 1 и от -60° до $+60^\circ$. При этих условиях создаются благоприятные возможности для полной компенсации реактивной мощности во всех фазах и полного симметрирования активной нагрузки при условии плавного регулирования параметров трехфазной УПК.

В реферируемой работе предложена методика, которая дает возможность получить расчетные выражения фазовых компенсационных токов, способных обеспечить полное симметрирование нагрузки и компенсацию реактивной мощности для различных схем соединения обмоток силового трансформатора и различных мест подключения установки параллельной компенсации.

Для выявления принципиальных возможностей УПК в виде несимметричного треугольника реактивных элементов приняты следующие допущения:

- первичная система приложенных напряжений симметрична;
- в кривых тока и напряжений отсутствуют высшие гармонические;

в) питающая линия электропередачи симметрична и имеет активное сопротивление на фазу — R ом/км.

Эта методика предполагает следующие этапы расчета:

1) с учетом параметров несимметричной нагрузки составляются уравнения в векторной форме, связывающие фазовые токи силового трансформатора с величинами нагрузки и неизвестными на данном этапе фазными значениями компенсационных токов;

2) после представления комплексов в алгебраической форме, система уравнений решается относительно фазовых значений токов трансформатора;

3) определяются модули фазовых токов трансформатора;

4) составляется уравнение потерь мощности в ЛЭП и определяется ее минимум с помощью частных производных по трем компенсационным токам (минимум потерь в любом элементе, с учетом допущения по пункту «в», имеет место при передаче симметричной нагрузки с фазовыми значениями $\cos \varphi = 1$);

5) решается система уравнений, полученная по предыдущему пункту, и из нее определяются величины фазовых компенсационных токов, обеспечивающие симметрирование нагрузки и компенсацию реактивной мощности;

6) производится выбор той или иной схемы УПК и ее параметров на основании технико-экономических расчетов.

Подобная методика расчетов позволяет сравнивать различные варианты подключения установок компенсации, эффективность их действия. При этом обеспечивается возможность рассчитать необходимые величины токов в фазах установки параллельной компенсации в функции от нагрузки.

Расчетные соотношения для определения параметров несимметричных компенсационных установок получены применительно к двухобмоточным и трехобмоточным трансформаторам при подключении УПК со стороны низкого напряжения, районной обмотки со стороны высокого напряжения и при подключении УПК в блоке со специальным трансформатором.

На рис. 1 в качестве примера показано подключение УПК со стороны среднего напряжения трехобмоточного трансформатора и дана векторная диаграмма, отражающая состояние нагрузки до и после компенсации. Выражения

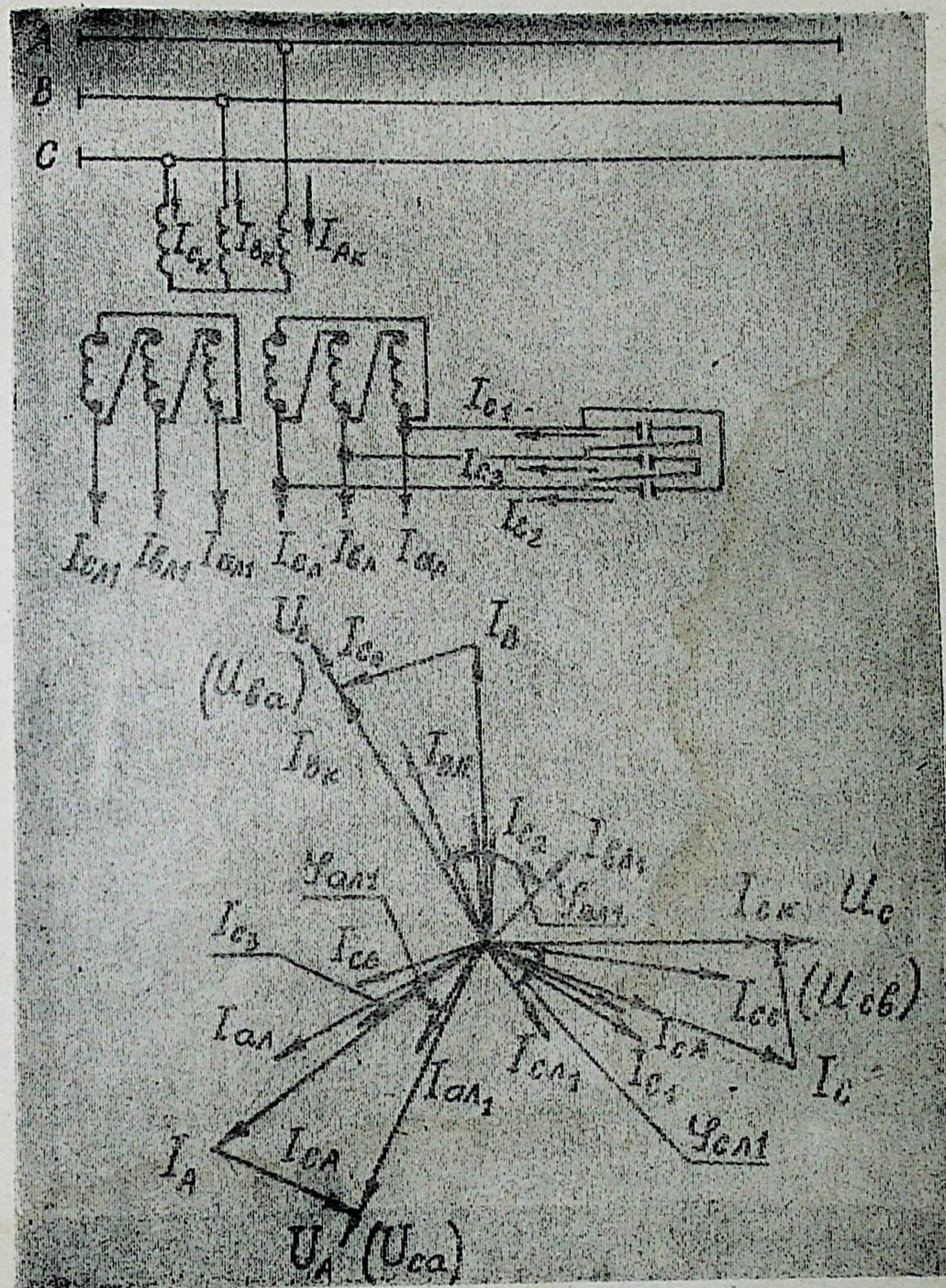


Рис. 1

для определения величин компенсационных токов, полученные в работе, имеют следующий вид:

$$I_{c1} = \left(I_{ал} \sin \varphi_{ал} + \frac{1}{\sqrt{3}} I_{сл} \cos \varphi_{сл} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{вл} \cos \varphi_{вл} \right) + \\ + \frac{k_1}{k} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} I_{вл_1} \cos \varphi_{вл_1} + \frac{1}{\sqrt{3}} I_{сл_1} \cos \varphi_{сл_1} + I_{ал_1} \sin \varphi_{ал_1} \right) \\ I_{c2} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_{вл} \cos \varphi_{вл} + I_{сл} \sin \varphi_{сл} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{ал} \cos \varphi_{ал} \right) + \\ + \frac{k_1}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_{вл_1} \cos \varphi_{вл_1} + I_{сл_1} \sin \varphi_{сл_1} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{ал_1} \cos \varphi_{ал_1} \right) \\ I_{c3} = \left(I_{вл} \sin \varphi_{вл} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{сл} \cos \varphi_{сл} + \frac{1}{\sqrt{3}} I_{ал} \cos \varphi_{ал} \right) + \\ + \frac{k_1}{k} \left(I_{вл_1} \sin \varphi_{вл_1} + \frac{1}{\sqrt{3}} I_{ал_1} \cos \varphi_{ал_1} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{сл_1} \cos \varphi_{сл_1} \right)$$

где

$I_{ал}, I_{вл}, I_{сл}$ — фазовые значения токов нагрузки со стороны района;

$\varphi_{ал}, \varphi_{вл}, \varphi_{сл}$ — угловые сдвиги между фазовыми значениями токов нагрузки и соответствующими им напряжениями;

$I_{ал_1}, I_{вл_1}, I_{сл_1}$ — токи нагрузки со стороны низкого напряжения;

$\varphi_{ал_1}, \varphi_{вл_1}, \varphi_{сл_1}$ — соответствующие угловые сдвиги;

k, k_1 — коэффициенты трансформации

$$\left(k = \frac{U_{ф.нн}}{U_{ф.вн}} ; k_1 = \frac{U_{ф.сн}}{U_{ф.вн}} \right)$$

Из представленной векторной диаграммы видно, что подключение установки с рассчитанными параметрами приведет к полной компенсации реактивной мощности и симметрированию нагрузки.

Проделанное в работе сравнение типовой УПК и схемы несимметричного треугольника реактивных элементов показало, что при условии плавного регулирования параметров трехфазная установка может для любой нагрузочной ситуации давать минимальные потери мощности. Возможности же плавнорегулируемой однофазной установки более ограничены.

Сопоставление этих двух схем выявило большие технические преимущества трехфазных несимметричных устройств компенсации.

Необходимая установленная реактивная мощность компенсационного устройства, обеспечивающая одновременное полное симметрирование токов и полную компенсацию реактивной мощности, как показано в работе, равна суммарной реактивной мощности нагрузки. Для осуществления симметрирования нагрузки емкостными компенсационными установками специальных затрат реактивной мощности не производится. Процесс симметрирования осуществляется попутно за счет рационального перераспределения по фазам установленной реактивной мощности.

Следует отметить, что в ряде случаев может оказаться целесообразной неполная компенсация реактивной мощности с какой-то степенью несимметрии активной нагрузки по фазам. Это нашло отражение в методике проектирования.

Также рассмотрены вопросы выбора установок с нерегулируемыми параметрами, полученными на основании статистических материалов о нагрузках и их угловых сдвигах. Можно применить вероятностную методику определения значений токов нагрузки и соответствующих им сдвигов. Однако в настоящее время не имеется достаточной информации о закономерности изменения и стохастической связи между изменяющимися величинами различных нагрузок электрических систем. Это приводит к необходимости находить величину фазовых токов нагрузки и их угловых сдвигов на основании статистического анализа данных, полученных в результате экспериментов, проведенных в реальных условиях работы подстанции и системы в целом.

В диссертационной работе дается методика проектирования несимметричных компенсационных установок, которая позволяет по заданным исходным параметрам нагрузки получить оптимальные параметры компенсационной установки для следующих случаев:

для определения величин компенсационных токов, полученные в работе, имеют следующий вид:

$$I_{c1} = \left(I_{ал} \sin \varphi_{ал} + \frac{1}{\sqrt{3}} I_{сл} \cos \varphi_{сл} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{вл} \cos \varphi_{вл} \right) +$$

$$+ \frac{k_1}{k} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} I_{вл_1} \cos \varphi_{вл_1} + \frac{1}{\sqrt{3}} I_{сл_1} \cos \varphi_{сл_1} + I_{ал_1} \sin \varphi_{ал_1} \right)$$

$$I_{c2} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_{вл} \cos \varphi_{вл} + I_{сл} \sin \varphi_{сл} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{ал} \cos \varphi_{ал} \right) +$$

$$+ \frac{k_1}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_{вл_1} \cos \varphi_{вл_1} + I_{сл_1} \sin \varphi_{сл_1} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{ал_1} \cos \varphi_{ал_1} \right)$$

$$I_{c3} = \left(I_{вл} \sin \varphi_{вл} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{сл} \cos \varphi_{сл} + \frac{1}{\sqrt{3}} I_{ал} \cos \varphi_{ал} \right) +$$

$$+ \frac{k_1}{k} \left(I_{вл_1} \sin \varphi_{вл_1} + \frac{1}{\sqrt{3}} I_{ал_1} \cos \varphi_{ал_1} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{сл_1} \cos \varphi_{сл_1} \right)$$

где

$I_{ал}$, $I_{вл}$, $I_{сл}$ — фазовые значения токов нагрузки со стороны района;

$\varphi_{ал}$, $\varphi_{вл}$, $\varphi_{сл}$ — угловые сдвиги между фазовыми значениями токов нагрузки и соответствующими им напряжениями;

$I_{ал_1}$, $I_{вл_1}$, $I_{сл_1}$ — токи нагрузки со стороны низкого напряжения;

$\varphi_{ал_1}$, $\varphi_{вл_1}$, $\varphi_{сл_1}$ — соответствующие угловые сдвиги;

k , k_1 — коэффициенты трансформации

$$\left(k = \frac{U_{ф.нн}}{U_{ф.вн}} ; k_1 = \frac{U_{ф.сн}}{U_{ф.вн}} \right)$$

Из представленной векторной диаграммы видно, что подключение установки с рассчитанными параметрами приведет к полной компенсации реактивной мощности и симметрированию нагрузки.

Проделанное в работе сравнение типовой УПК и схемы несимметричного треугольника реактивных элементов показало, что при условии плавного регулирования параметров трехфазная установка может для любой нагрузочной ситуации давать минимальные потери мощности. Возможности же плавнорегулируемой однофазной установки более ограничены.

Сопоставление этих двух схем выявило большие технические преимущества трехфазных несимметричных устройств компенсации.

Необходимая установленная реактивная мощность компенсационного устройства, обеспечивающая одновременное полное симметрирование токов и полную компенсацию реактивной мощности, как показано в работе, равна суммарной реактивной мощности нагрузки. Для осуществления симметрирования нагрузки емкостными компенсационными установками специальных затрат реактивной мощности не производится. Процесс симметрирования осуществляется попутно за счет рационального перераспределения по фазам установленной реактивной мощности.

Следует отметить, что в ряде случаев может оказаться целесообразной неполная компенсация реактивной мощности с какой-то степенью несимметрии активной нагрузки по фазам. Это нашло отражение в методике проектирования.

Также рассмотрены вопросы выбора установок с нерегулируемыми параметрами, полученными на основании статистических материалов о нагрузках и их угловых сдвигах. Можно применить вероятностную методику определения значений токов нагрузки и соответствующих им сдвигов. Однако в настоящее время не имеется достаточной информации о закономерности изменения и стохастической связи между изменяющимися величинами различных нагрузок электрических систем. Это приводит к необходимости находить величину фазовых токов нагрузки и их угловых сдвигов на основании статистического анализа данных, полученных в результате экспериментов, проведенных в реальных условиях работы подстанции и системы в целом.

В диссертационной работе дается методика проектирования несимметричных компенсационных установок, которая позволяет по заданным исходным параметрам нагрузки получить оптимальные параметры компенсационной установки для следующих случаев:

а) полной компенсации реактивной мощности и полного симметрирования нагрузки;

б) частичной компенсации реактивной мощности при неполном симметрировании нагрузки;

в) улучшения режима с несимметричной нагрузкой при использовании определенной наперед заданной суммарной реактивной мощности элементов.

В диссертации приводятся графический, графоаналитический и аналитический методы расчетов параметров трехфазных несимметричных УПК.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ И РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

С целью получения статистических данных о естественных значениях коэффициента мощности тяговых подстанций переменного тока, величине несимметрии нагрузки и для изучения эффективности действия существующих УПК были проведены эксперименты на ряде тяговых подстанций переменного тока Западно-Сибирской и Восточно-Сибирской железных дорог. Эксперименты подтвердили теоретические соображения о том, что при значительном изменении тяговых нагрузок в плечах питания существующая установка параллельной компенсации зачастую не приносит необходимого эффекта.

С целью проверки возможностей различных схем компенсационных установок и подтверждения теоретических выводов была создана лабораторная экспериментальная установка. С помощью этой установки можно отдельно исследовать влияние несимметрии нагрузки и ее несинусоидальности на энергетические показатели питающей энергосистемы и ее отдельных звеньев.

В исследуемую схему вводились гармоники различных порядков с наложением на основную частоту. В лабораторных условиях имитировались различные нагрузки в плечах питания с широким варьированием их угловых сдвигов, проверялась эффективность действия существующей схемы УПК и предлагаемой трехфазной несимметричной

установки. Во всем диапазоне изменения нагрузок $\left(\frac{I_{2H}}{I_{1H}}\right)$ из-

менялось от 0 до 1, $\frac{I_{1H}}{I_{2H}}$ — от 1 до 5, φ_{1H} и φ_{2H} — от 20 до 40°)

наибольший эффект получался при подключении УПК в виде несимметричного треугольника реактивных элементов. В режимах с высшими гармоническими, величина которых соответствовала процентному содержанию их в реальных условиях, наблюдалось появление некоторой несимметрии и угловых сдвигов, но эти отклонения, в целом, были не так существенны. Следует отметить, что вопросы влияния высших гармонических на работу УПК требуют дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Результаты лабораторных исследований показали хорошую сходимость с полученными теоретическими расчетами как для условий полной компенсации, реактивной мощности и симметрирования нагрузок, так и для частичного выполнения этих условий.

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Наиболее рациональное распределение и использование электрической энергии находятся в прямой связи с компенсацией реактивной мощности и снижением несимметрии токов и напряжений. Применение установок параллельной компенсации, способных решать комплексно эти задачи, имеет большое народно-хозяйственное значение.

Затраты будут определяться конкретными условиями, так как они зависят от места подключения УПК, ее схемы и параметров, от способа регулирования и управления этой установкой. В работе получены общие выражения для эффекта, проявляемого в отдельных элементах системы, и затрат, связанных со стоимостью применяемого оборудования, материалов, монтажом и эксплуатационными расходами на УПК.

Теоретические расчеты и экспериментальное их подтверждение позволили перейти к задаче практического проектирования такой несимметричной установки параллельной компенсации, собранной по схеме треугольника на какой-либо подстанции, и обоснования ее технико-экономической эффективности. Предварительно были произведены

экспериментальные исследования для сбора статистического материала, характеризующего нагрузку тяговых подстанций, где предполагалось внедрение предлагаемых установок.

На основании полученных материалов, для двух подстанций, на которых остро ощущается необходимость повышения энергетических показателей, были рассчитаны параметры трехфазных несимметричных установок параллельной компенсации. Для этого предварительно построены статистические кривые распределения токов фаз (для подстанции 3 Восточно-Сибирской ж. д. эти кривые представлены на рис. 2) и найдены зависимости угловых сдвигов в фазах питающей ЛЭП от величины загрузки каждой из них: $\varphi_A = f(I_A)$, $\varphi_B = f(I_B)$, $\varphi_C = f(I_C)$.

Дальнейшие расчеты показали, что оптимальная суммарная мощность трехфазной несимметричной установки для подстанции 3 составляет 6000 квар емкостных. С учетом выбранных параметров УПК и эффекта, который она создает в смысле симметрирования нагрузки и компенсации реактивной мощности, построены новые кривые распределения нагрузки подстанции 3. Эти кривые нанесены на рис. 2 и в сравнении с исходными кривыми распределения сдвинуты влево, что означает снижение нагрузки в каждой фазе за счет более равномерного распределения ее по трем фазам. Наиболее вероятные значения токов без УПК были следующие: в фазе А — 73,5 а, в фазе В — 86,5 а, в фазе С — 67,3 а (кривые 1, рис. 2), после подключения УПК с расчетными параметрами они уменьшились в фазе А до 64 а, в фазе В до 66,5 а, в фазе С до 55 а (кривые 2, рис. 2), при этом значительно уменьшились и их угловые сдвиги. Такое заметное улучшение режима работы подстанции приводит к быстрому сроку окупаемости предлагаемого устройства параллельной компенсации с нерегулируемыми параметрами. Для подстанции 3 срок окупаемости не превышает 1,6 лет, что свидетельствует о высокой эффективности внедрения таких установок.

Подобные же расчеты были произведены для одной из подстанций Западно-Сибирской железной дороги. На основании предварительно полученных статистических материалов о нагрузке подстанции сравнивались три варианта по потерям мощности в питающей ЛЭП — работа подстанции

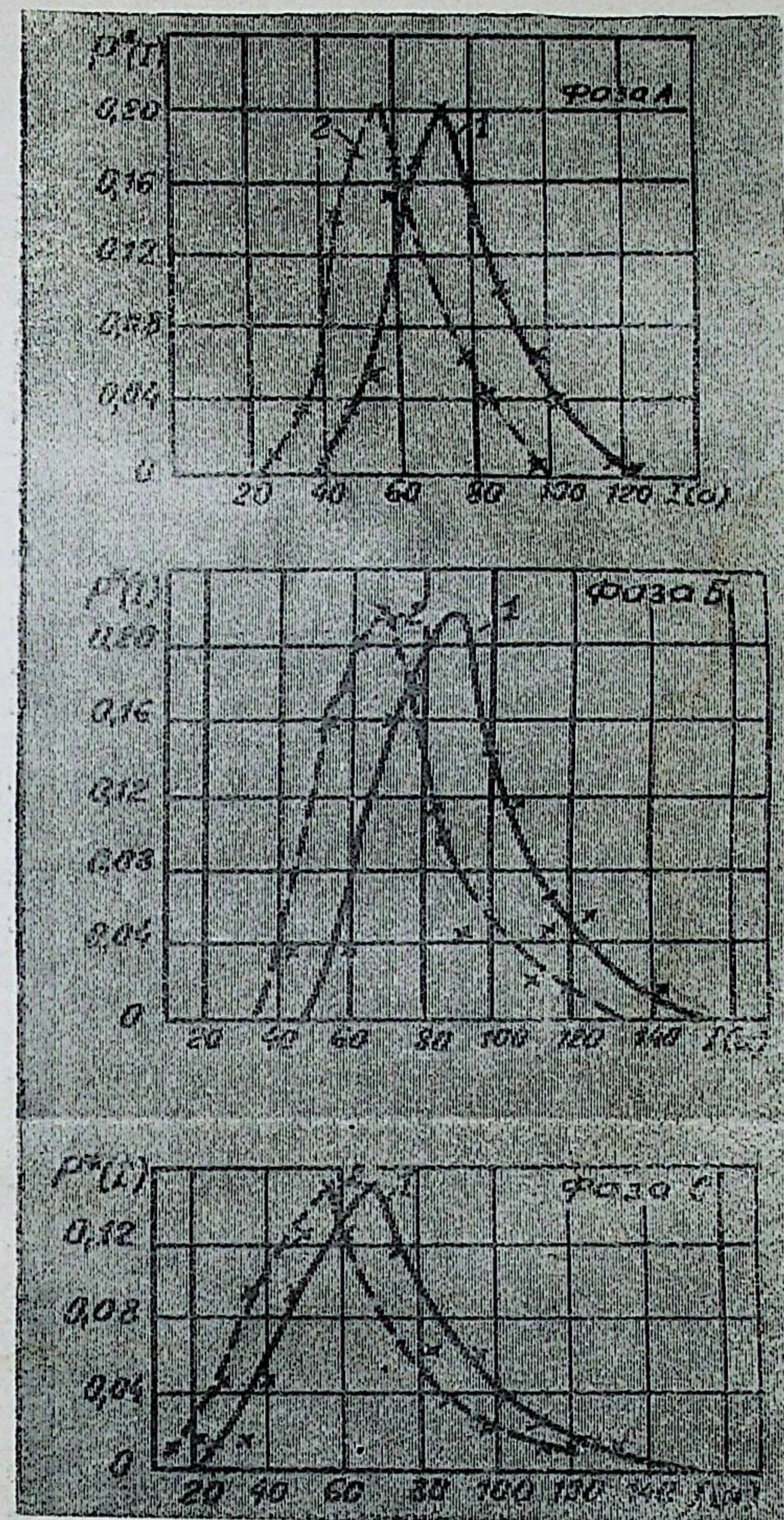


Рис. 2

без УПК, работа подстанции с типовой однофазной установкой параллельной компенсации и работа подстанции с предлагаемым нерегулируемым устройством расчетных параметров (суммарная мощность установки составила 10800 квар). Сроки окупаемости были подсчитаны только на основании стоимости потерь мощности в питающей линии электропередач.

Результаты расчетов показали, что срок окупаемости трехфазной несимметричной установки в сопоставлении с однофазной УПК не превышает трех лет. Эффект был определен без учета ряда факторов, которые могли бы усилить его. Так, не учитывались потери в трансформаторе, увеличение располагаемой мощности этого трансформатора, не принималось в расчет изменение величины потерь мощности от уменьшения величин реактивных составляющих токов на реактивном сопротивлении питающих ЛЭП и т. д.

Положительные выводы о высокой эффективности применения трехфазных несимметричных установок параллельной компенсации сделали возможным осуществить монтаж подобной установки на одной из подстанций Западно-Сибирской железной дороги и намечается внедрение другого устройства на подстанции 3 Восточно-Сибирской железной дороги.

Сравнительная экономическая эффективность установок параллельной компенсации, различающихся схемой и степенью компенсации, а также местом подключения, должна рассчитываться в каждом конкретном случае с учетом расчетной стоимости установки и эффекта, проявляющегося во всех элементах системы энергоснабжения.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что метод относительных приростов потерь мощности, принятый в настоящей работе, может выступать в виде объективного критерия для оценки эффективности компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузки различными схемами компенсационных установок.

2. Показано, что существующая типовая установка параллельной компенсации реактивной мощности на тяговой подстанции переменного тока может давать существенный положительный эффект только в весьма ограниченных

частных случаях нагрузки из-за недостатков, присущих самой однофазной схеме включения емкостей.

3. Предложенная в работе трехфазная несимметричная компенсационная установка дает возможность осуществлять одновременно полные или, по желанию, частичные компенсации реактивной мощности и симметрирование токов для любых возможных комбинаций нагрузки при условии регулирования ее параметров.

4. Разработана методика расчета параметров несимметричных компенсационных установок применительно к подстанциям с двухобмоточными и трехобмоточными понизительными трансформаторами и различными местами подключения УПК для полной и частичной компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузки.

5. Проведено технико-экономическое обоснование целесообразности внедрения несимметричных трехфазных компенсационных установок на примере двух тяговых подстанций электрических железных дорог.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Сапельченко А. М. Влияние способа присоединения устройств параллельной компенсации на повышение коэффициента мощности. Научные труды ОМИИТа, т. 60, Омск, 1965.
2. Сапельченко А. М., Аввакумов В. Г. Возможные способы компенсации реактивной мощности и несимметрии трехфазной системы; рациональные области их применения. Научные труды ОМИИТа, т. 74, издательство «Транспорт», М., 1967.
3. Дубровский В. П., Сапельченко А. М. Параллельно-емкостная компенсация реактивной мощности при трехфазно-двухфазных трансформаторах. Научные труды ОМИИТа, т. 74, издательство «Транспорт», М., 1967.
4. Аввакумов В. Г., Сапельченко А. М. Некоторые вопросы компенсации реактивной мощности и несимметрии нагрузки в трехфазной системе. Научные труды ОМИИТа, т. 71, Омск, 1967.
5. Сапельченко А. М. Экспериментальные исследования различных схем параллельно-емкостной компенсации. Научные труды ОМИИТа, т. 71, Омск, 1967.
6. Аввакумов В. Г., Сапельченко А. М. Особенности компенсации реактивной мощности в несимметрично-загруженных цепях

устройствами параллельной емкостной компенсации. Научные труды ОМИИТа, т. 83, Омск, 1967.

**В ПРОЦЕССЕ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ
МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКЛАДЫВАЛИСЬ АВТОРОМ:**

а) на научно-технической конференции ДОРНТО Западно-Сибирской железной дороги, посвященной 100-летию НТО, г. Новосибирск, 1966;

б) на XI научно-технической конференции Уральского электромеханического института инженеров железнодорожного транспорта и научно-технического общества Свердловской железной дороги, г. Свердловск, 1967;

в) на XXIX научно-технической конференции Омского института инженеров железнодорожного транспорта и научно-технического общества Западно-Сибирской железной дороги, г. Омск, 1967.