

Л. А. ГЕРМАН, доктор техн. наук

Продольная емкостная компенсация в системе тягового электроснабжения переменного тока

Интенсивное внедрение установок продольной емкостной компенсации (УПК) в системе тягового электроснабжения переменного тока на отечественных железных дорогах происходило в 1972–1985 гг. Их применяли на тех участках, где почти половина потерь напряжения в зоне системы тягового электроснабжения, расположенной до токоприемника, определялась потерями в трансформаторе тяговых подстанций и в питающих высоковольтных линиях ВЛ 110 (220) кВ. В те годы включение УПК на тяговых подстанциях позволило решить проблему пропускной способности ряда участков железных дорог. В частности, на Горьковской железной дороге работали 14 таких установок мощностью от 1 до 2,6 Мвар.

В настоящее время интерес к УПК возрастает в связи с интенсивным движением тяжеловесных поездов и перспективой скоростного движения на ряде железнодорожных магистралей России. Вновь вводятся в работу УПК на дорогах Сибири, для которых характерны большие тяговые нагрузки. Намечается изготовление УПК на отечественных заводах. В связи с этим приобретает ценность имеющийся опыт разработки, проектирования и эксплуатации УПК для системы тягового электроснабжения 25 кВ.

Установки продольной емкостной компенсации обладают замечательным свойством — они автоматически (без применения переключающих устройств) при постоянно изменяющейся тяговой нагрузке железных дорог поддерживают напряжение в контактной сети на заданном уровне. Это достигается путем компенсации индуктивного сопротивления сети емкостным сопротивлением УПК, что приводит к уменьшению суммарного сопротивления участка системы электроснабжения до токоприемника и, следовательно, к снижению потерь напряжения. Однако должного распространения установки продольной емкостной компенсации на железных дорогах России пока еще не получили, и главная причина этого — отсутствие возможности промышленного изготовления надежных установок УПК.

Место включения УПК

В системе тягового электроснабжения УПК можно включать на вводе 110 (220) кВ тяговых подстанций, на шинах 27,5 кВ, а также непосредственно в контактную

сеть: на постах секционирования (ПС), между подвесками контактной сети четного и нечетного путей и т. д. Наибольший эффект достигается при включении УПК непосредственно в контактную сеть и (или) на тяговой подстанции.

Включение УПК в контактную сеть (рис. 1) позволяет эффективно уменьшать потери напряжения до токоприемника электроподвижного состава (ЭПС). Однако при этом трудно обеспечить беспрепятственный проход токоприемника по воздушному промежутку в контактной сети около УПК-1: как правило, проход токоприемника сопровождается скачком напряжения и образованием дуги. В ряде случаев воздушный промежуток заменяют нейтральной вставкой, по которой ЭПС следует с отключением тока. Кроме того, при параллельной работе тяговых подстанций возможно увеличение уравнительного тока, протекающего по контактной сети. В настоящее время УПК

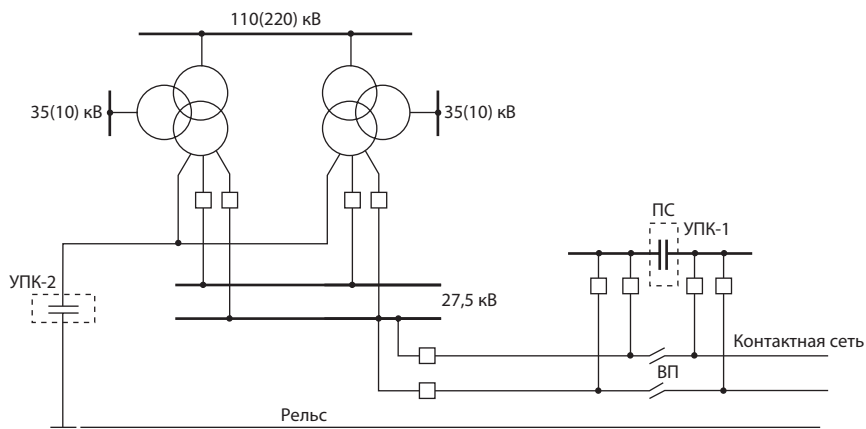


Рис. 1. Варианты включения УПК в тяговой сети

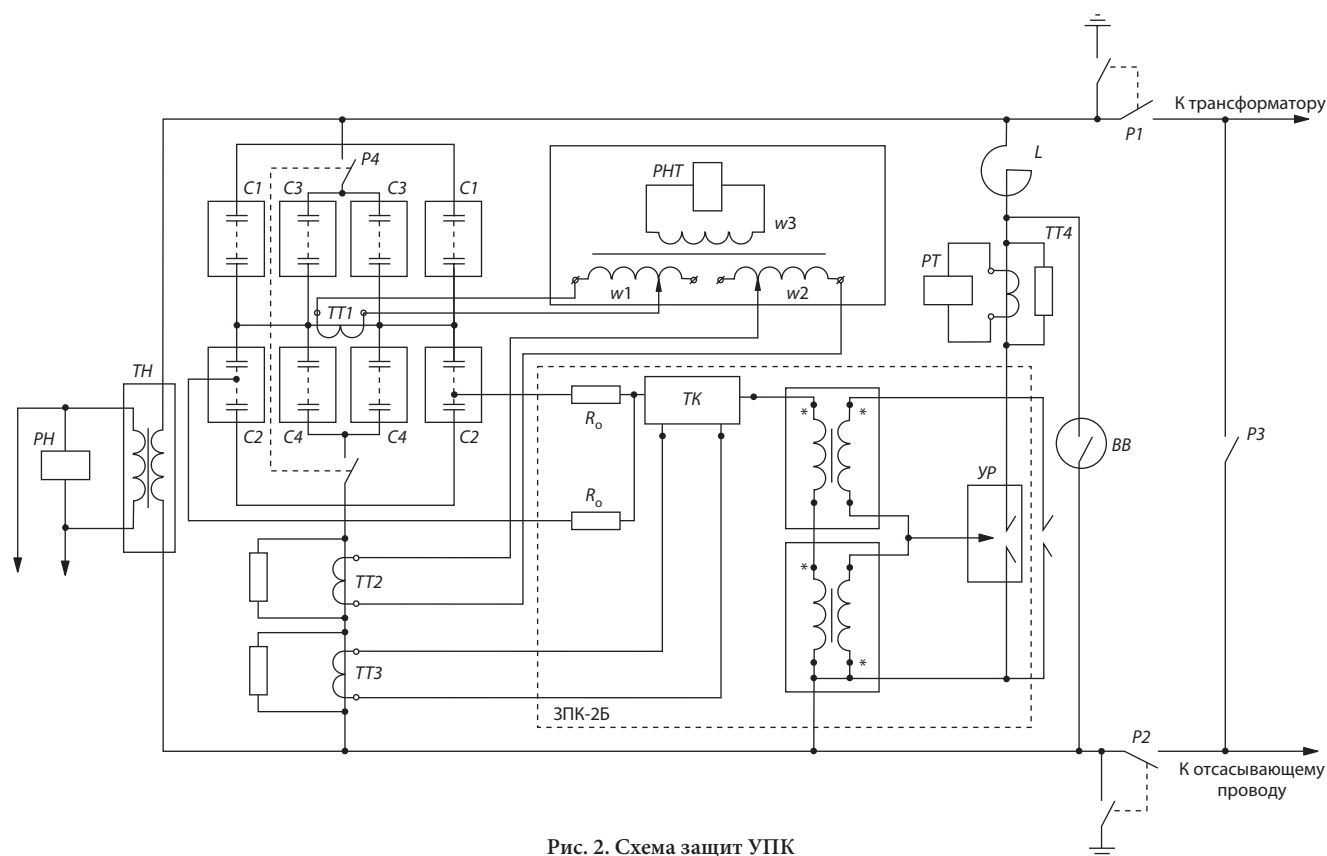


Рис. 2. Схема защит УПК

в контактной сети по рассматриваемой схеме пока не включают. Тем не менее с ростом тяговой нагрузки и увеличением потерь напряжения в тяговой сети придется включать УПК непосредственно в контактную сеть и прежде всего в фидерных зонах с односторонним питанием (например, в зоне стыкования энергосистем).

На тяговых подстанциях с трансформаторами, обмотки которых соединены по схеме «звезда — треугольник», УПК следует включать на стороне 27,5 кВ в отсасывающий провод (УПК-2 на рис. 1). В этом случае одновременно с повышением и стабилизацией напряжения происходит еще и его симметрирование на шинах 27,5 кВ. В результате улучшается режим на-

пряжения в высоковольтной линии, питающей устройства СЦБ, системе питания нетяговых потребителей ДПР 27,5 кВ, а также в цепях собственных нужд тяговых подстанций. При включении УПК в отсасывающий провод упрощается коммутационная аппаратура: ее можно выполнить на напряжение 10 кВ.

Схемное решение УПК

УПК состоит из секций конденсаторов; на рис. 2 показана одна секция, состоящая из блоков конденсаторов C1 — C4, соединенных последовательно-параллельно. Число конденсаторов в блоках и секций определяется рассчитанным значе-

нием номинального тока и сопротивлением установки.

Используя современные конденсаторы фирмы Nokia, целесообразно выполнить базовую секцию из 24 конденсаторов (четыре параллельно включенных блока, каждый из которых содержит шесть последовательно включенных конденсаторов). В зависимости от требуемого номинального тока и сопротивления УПК число последовательно включенных конденсаторов в блоке может быть уменьшено до двух-трех, а параллельно включенных блоков — до четырех.

Таким образом, секция из конденсаторов с указанными параметрами может иметь мощность от 1,2 до 3,6 Мвар.

УПК способна мягко изменять номинальный ток и свое сопротивление (как в сторону увеличения, так и уменьшения). В условиях постоянно меняющейся тяговой нагрузки целесообразно выполнять сезонную регулировку мощности УПК, а также увеличивать ее через

Технические характеристики конденсаторов	
Номинальный ток, А	100
Номинальное напряжение, В	1500
Сопротивление, Ом	15
Номинальная мощность, квар	150

каждые 3–4 года в связи с ежегодным ростом тяговой нагрузки на 4–5%.

УПК выводят из работы, включая разъединитель $P3$ и отключая $P1$ и $P2$ (см. рис. 2). Для автоматизации процесса переключения УПК целесообразно применять разъединитель $P3$ с моторным приводом.

На базе опыта разработок и эксплуатации УПК на Горьковской железной дороге головной проектный институт «Трансэлектропроект» в 1989 г. выпустил типовый проект «Унифицированные тяговые подстанции магистральных железных дорог. Устройство продольной емкостной компенсации на подстанциях переменного тока (ОТМ32-4243 ЭСТ)», который может быть использован и в современных условиях.

Устройство защиты

Для обеспечения надежной работы УПК применена сверхбыстродействующая защита от сквозных токов короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети (защита ЗПК-2Б, разработана в 1977 г.). После включения этой защиты на всех УПК Горьковской дороги прекратились массовые повреждения конденсаторов.

В защите ЗПК-2Б использован управляемый трехэлектродный разрядник (тригatron) УР (см. рис. 2) с запуском по току и напряжению аварийного режима, осуществляемым тиристорно-варисторным ключом ТК, подсоединенным к одному-двум рядам конденсаторов и трансформатору тока ТТЗ. Время срабатывания защиты составляет 1 мс — от достижения уставки до момента шунтирования конденсаторов. Это позволяет ограничить перенапряжения на конденсаторах УПК до допустимых значений и предотвратить прохождение через них установившегося тока КЗ (20 кА и более). В настоящее время целесообразно заменить трехэлектродный разряд-

ник на управляемый вакуумный, разработанный ВЭИ.

Срабатывание защиты УПК вызывает включение вакуумного выключателя ВВ (см. рис. 2), шунтирующего конденсаторы реактором L , ограничивающим сверхтоки. При включении УПК в отсасывающий провод применяют вакуумный выключатель на 10 кВ с временем включения 0,05 с. Команда на автоматическое повторное включение УПК в работу (т. е. отключение ВВ) дается только после проверки исправности конденсаторов, которые могут быть повреждены при сквозном КЗ. Проверка выполняется с помощью небалансной защиты, выполненной на дифференциальном реле РНТ.

После включения выключателя при срабатывании защиты ЗПК-2Б от сквозных токов КЗ возникает колебательный процесс в контуре «конденсаторы УПК — ограничительный реактор L » длительностью от 0,2 до 0,3 с. Этого достаточно для того, чтобы в случае повреждения конденсаторов сработало реле РНТ и заблокировало ввод УПК в работу.

Переключаемая УПК

Число трансформаторов, включаемых в работу, а также схема внешнего электроснабжения могут изменяться, в результате чего изменится индуктивное сопротивление сети. В связи с этим должно измениться и емкостное сопротив-

ление УПК, т. е. необходимо, чтобы установка продольной компенсации была переключаемой.

В определенных ситуациях (например, в вынужденном режиме при отключении смежной подстанции) на рассматриваемой подстанции возрастает тяговый ток и может появиться необходимость в подключении второго (или третьего) трансформатора. В этом случае необходимо уменьшить сопротивление УПК, но увеличить ее номинальный ток, т. е. переключить УПК на режим работы с двумя (тремя) трансформаторами.

Переключаемая УПК может быть выполнена по одной из двух схем. В простейшем варианте в УПК при включении второго трансформатора разъединителем P подключают параллельно работающей секции конденсаторов 1 дополнительную секцию 2 (рис. 3, а) или внутри одной секции подсоединяют дополнительный блок конденсаторов (рис. 3, б). Как правило, на подстанции (обычно двухтрансформаторной) работает один трансформатор, при этом дополнительная секция конденсаторов отключена, т. е. степень их использования невелика.

Второй, более совершенный вариант схемы позволяет использовать все конденсаторы в случае включения как одного, так и двух трансформаторов (рис. 4). В этом варианте УПК делится на блоки, которые переключают с параллельного на последовательное соединение (и наоборот) с помощью двух управляемых разъединителей $P1$ и

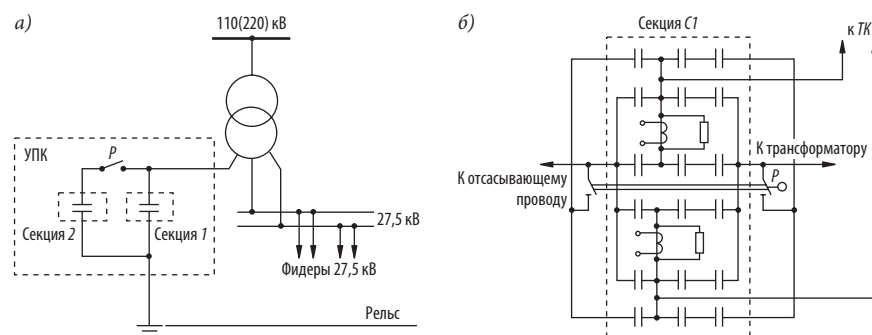


Рис. 3. Переключаемая УПК с дополнительной секцией конденсаторов (а) и с переключением внутри секции (б)

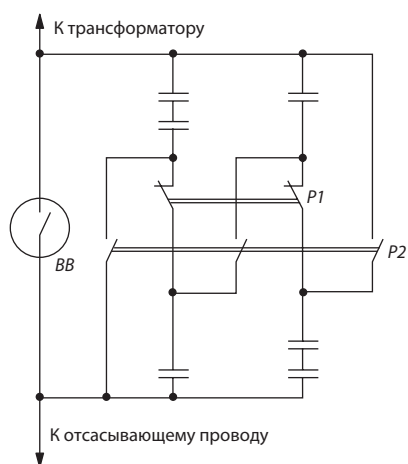


Рис. 4. Переключаемая УПК с сохранением всей мощности в работе

Р2. При отключении разъединителя $P1$ и включении $P2$ номинальный ток УПК увеличивается в 1,5 раза, а сопротивление уменьшается в 2,25 раза. На Горьковской железной дороге по второму варианту схемы были включены 12 установок УПК.

Расчет мощности УПК

Мощность УПК определяется номинальным током и сопротивлением.

В том случае, когда емкостное сопротивление УПК меньше предвключенного индуктивного, стабилизация напряжения будет недостаточной. Если же емкостное сопротивление превысит предвключенное индуктивное, могут возникнуть опасные перенапряжения в тяговой сети. Отсюда следует, что выбор сопротивления УПК — ответственный этап расчета.

Выбирая номинальный ток УПК, необходимо помнить следующее: с его уменьшением повышается опасность увеличения повреждений конденсаторов, а с увеличением возрастает стоимость УПК и, следовательно, уменьшается ее эффективность. При расчете номинального тока следует учитывать, что во всех режимах нагрузка конденсаторов рассматриваемого типа не должна превосходить нормированного значения.

Номинальный ток УПК можно определить наиболее точно путем длительных экспериментальных исследований нагрузки во всех реальных режимах работы тяговой подстанции. Если нет возможности проверить в реальных условиях все режимы, для расчета используют имитационные модели на ЭВМ. При этом важно правильно задать реальные исходные данные по организации движения поездов. Зачастую вследствие того, что невозможно точно выбрать исходные данные на ближайшую перспективу, расчетные максимальные токи нагрузок получаются завышенными. Эксплуатационный персонал обычно стремится уточнить расчеты, производя измерения нагрузки УПК в реальных условиях эксплуатации.

В проектной и эксплуатационной практике может быть применен упрощенный метод расчета номинального тока УПК, предполагающий использование ограниченного набора исходных данных. В основе его лежит следующий принцип. Выбранная мощность (номинальный ток) УПК не должна ограничивать мощность подстанции (трансформаторов). Совершенно ясно, что если тяговая нагрузка значительно меньше установленной мощности подстанции, то выбранный номинальный ток УПК завышен. В этом случае эксплуатационный персонал должен отключить часть конденсаторов для приведения в соответствие характеристик УПК и тяговой нагрузки.

Упрощенный метод расчета номинального тока УПК сводится к следующему.

Принимается, что УПК включается в отсасывающий провод тяговой подстанции, используются надежные конденсаторы фирмы Nokia (допускается непрерывная длительная токовая перегрузка, равная 1,3 номинального значения, а в течение 10 мин — 1,5 номинального тока).

По номинальной мощности трансформатора определяют токи

в плече питания и (или) в отсасывающем проводе.

По найденному току рассчитывают номинальный ток УПК с учетом непрерывной длительной перегрузки конденсаторов. В частности, для трансформатора мощностью 40 МВ·А номинальный ток в отсасывающем проводе равен 950 А, а номинальный ток УПК в этом проводе составляет $950/1,3 = 730$ А (при двух включенных трансформаторах $950 \cdot 2/1,3 = 1460$ А). Номинальный ток УПК может быть меньше номинального тока трансформатора, поскольку средний ток трансформатора значительно меньше номинального в связи с колебаниями тяговой нагрузки.

Путем измерений или расчетов на ЭВМ определяют максимальный 10-минутный ток нагрузки и проверяют перегрузку УПК, номинальный ток которой выбран. Например, пусть максимальная 10-минутная тяговая нагрузка равна 2000 А, тогда соответствующая перегрузка конденсаторов будет $2000/1460 = 1,37$, что меньше ее допустимого значения 1,5.

Если перегрузка УПК выше нормированной, следует заново рассчитать номинальный ток.

Сопротивление УПК в отсасывающем проводе равно сумме сопротивлений фазы трансформатора (трансформаторов) и предвключенного сопротивления фазы системы внешнего электроснабжения (СВЭ). Допускается его увеличение в 1,3–1,5 раза.

Расчитанные упрощенным методом параметры УПК для подстанций с трансформаторами 40 МВ·А представлены в таблице. На основании этих параметров можно определить мощность УПК, которая будет составлять 4–10 Мвар.

Отметим важную особенность расчета номинального тока УПК. Как правило, чтобы повысить надежность и срок службы электрооборудования, его номинальный ток выбирают с некоторым запасом (обычно коэффициент запаса равен 1,2–1,3). Для УПК, исхо-

Параметры УПК, включенной в отсасывающий провод

Параметр УПК		Значение параметра при сопротивлении системы внешнего электроснабжения, Ом		
		0,5 – 1	1,5 – 2	2,5 – 3
Число конденсаторов	1-я ступень	6×2 + 4×2	6×3 + 6×3	6×4 + 6×4
	2-я ступень	2(6×2) + 4×2	2(6×3) + 4×3	2(6×4) + 4×4
Номинальный ток, А	1-я ступень	1000	1200	1200
	2-я ступень	1600	1600	1600
Сопротивление УПК, Ом	1-я ступень	3	3,75	5
	2-я ступень	1,87	2,81	3,75
Сопротивление подстанции (до шин 27,5 кВ) с учетом сопротивления СВЭ, Ом	при одном трансформаторе	2,5 – 3	3,5 – 4	4,5 – 5
	при двух трансформаторах	1,5 – 2	2,5 – 3	3,5 – 4

да из указанного коэффициента запаса, следует во столько же раз увеличить число последовательно включенных конденсаторов, чтобы сохранить расчетное емкостное сопротивление. Тогда мощность УПК возрастет в 1,44–1,69 раза. Следовательно, при желании иметь по номинальному току УПК запас в 20–30% приходится увеличивать мощность УПК в 1,44–1,69 раза. Именно поэтому рекомендуется выбирать запас по номинальному току не более 1,1–1,15.

Исходя из этого при расчете номинального тока УПК следует принимать коэффициент запаса равным 1,2–1,15.

Контроль износа конденсаторов

При изменяющейся тяговой нагрузке целесообразно постоянно контролировать износ конденсаторов УПК, по скорости которого можно судить о правильности выбора номинального тока. С этой целью разработан прибор ИК-1, определяющий скорость износа конденсаторов и дающий соответствующий прогноз.

С помощью измерительных преобразователей измеряют ток УПК и температуру наружного воздуха. Расчет износа выполняет микропроцессорное устройство по специ-

ально введенной программе; предвзительно оно же рассчитывает температуру конденсатора. Исходные данные — информация о режиме работы УПК, температура наружного воздуха — автоматически вводятся в устройство с заданным интервалом (около 1 мин). Результаты расчета выводятся на цифровое табло и подаются на УПК в виде управляющих воздействий.

Наличие такого прибора обязательно при эксплуатации УПК, так как он позволяет оценить надежность и экономичность этой установки. Эксплуатационный персонал с помощью ИК-1 определяет правильность выбора номинального тока УПК, не допуская его завышенного запаса при реальной нагрузке тяговой сети.

Регулирование напряжения тяговой подстанции с УПК

Совместное применение УПК в отсасывающем проводе и устройства автоматического регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой (АРПН) определяет принципиально новый подход к регулированию напряжения на тяговой подстанции с несимметричной нагрузкой.

Сопротивление УПК в отсасывающем проводе выбирают для компенсации сопротивления одной

фазы трансформатора и входного сопротивления СВЭ (хотя потери напряжения от тяговой нагрузки определяются сопротивлением двух фаз). В этом случае, во-первых, уменьшается мощность УПК, так как достаточно компенсировать только половину потерь напряжения, а во-вторых, происходит наибольшее симметрирование напряжения на шинах 27,5 кВ. В результате эффективнее работает трехфазное устройство РПН (АРПН) трансформаторов, реализующих большой диапазон регулирования напряжения в тяговой сети. В связи с этим компенсация второй половины потерь напряжения возлагается на это устройство.

Предложенный метод расчета сопротивления УПК, включенной в отсасывающий провод подстанции, позволяет выбрать мощность УПК без ненужного завышения и одновременно расширить возможности АРПН, которыми снабжены все трансформаторы тяговых подстанций.

Снижение уравнивающих токов

Рационально выбранный режим работы УПК совместно с АРПН трансформаторов позволяет на электрифицированном участке добиться минимальной разницы в ур-

нях напряжений смежных тяговых подстанций и тем самым уменьшить уравнительные токи. Сложность расчета такого режима определяется необходимостью рассматривать весь электрифицированный участок, а не одну обособленную межподстанционную зону. Кроме того, необходимо учитывать влияние на уравнительный ток системы внешнего электроснабжения.

Для совместного расчета на ЭВМ сетей внешнего и тягового электроснабжения с установками продольной и поперечной емкостной компенсации разработана программа РАСТ-05К.

Расчет режима напряжения на электрифицированном участке выполняют следующим образом:

- определяют исходный режим без УПК при номинальных коэф-

фициентах трансформации тяговых трансформаторов и средних нагрузках;

- изменяя коэффициенты трансформации, добиваются повышения напряжения в тяговой сети и выравнивания напряжений плеч питания смежных подстанций;

- при включении установки продольной емкостной компенсации в отсасывающий провод с целью дальнейшего уменьшения уравнительного тока выбирают сопротивление УПК, обеспечивающее выравнивание напряжений одноименных фаз смежных подстанций. Отметим, что УПК в этом случае влияет на продольную и поперечную составляющие напряжения и поэтому может уменьшить как активную, так и реактивную составляющую уравнительного тока.

Выводы

Как видно, УПК — многофункциональное устройство усиления системы электроснабжения и повышения качества электроэнергии. Это следует учитывать при сравнении вариантов модернизации системы тягового электроснабжения. Опыт Горьковской железной дороги подтверждает целесообразность совместного применения установок продольной и поперечной компенсации, а также устройств регулирования напряжения с помощью АРПН трансформаторов. С ростом тяговых нагрузок при тяжеловесном и скоростном движении УПК становится надежным средством повышения пропускной и провозной способности электрических железных дорог.



Журнал «Железные дороги мира»
и издательство «Интекст»



ПОИСК И ОБОБЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

о зарубежных рынках и инновациях
в области магистрального и промышленного
железнодорожного, а также городского рельсового транспорта

для компаний,

выходящих на внешний рынок,
заинтересованных в инновационных решениях,
ищущих поставщиков комплектующих.

Обзоры техники для железнодорожного
и городского рельсового транспорта

Статистическая информация

Подборки статей и других материалов
по железнодорожной тематике

Заинтересованные организации просим обращаться в редакцию журнала «Железные дороги мира»
по телефону (499) 317-55-65 и электронной почте zdm@css-rzd.ru