

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение  
(направленность (профиль))

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Оптимизация электроснабжения буровой установки»

Студент(ка)

С.А. Керенцев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.П. Тараканов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Тольятти 2016

## **Аннотация**

Рассмотрена оптимизация электроснабжения буровой установки с регулируемым приводом постоянного тока за счет применения фильтро-компенсирующих устройств.

Показано влияние фильтро-компенсирующих устройств на показатели качества электроэнергии регулируемых электроприводов буровых установок. Показано влияние фильтро-компенсирующего устройства с косвенной компенсацией реактивной мощности на показатели качества электроэнергии регулируемых электроприводов буровых установок. Выполнена оценка технико-экономических показателей проекта – установка фильтро-компенсирующего устройства с косвенной компенсацией реактивной мощности в схеме электроснабжения БУ3900.

Пояснительная записка содержит 64 страницы. Графический материал представлен на 6 листах формата А1.

## Содержание

	Введение	5
1	Электропривод постоянного тока буровой установки БУ3900	7
1.1	Главные механизмы электропривода постоянного тока буровой установки	7
1.2	Основные этапы развития электропривода буровых установок	10
1.3	Тиристорный электропривод буровых установок	17
1.4	Электропривод буровой лебедки	20
1.5	Электропривод ротора	27
1.6	Электропривод насоса	31
1.7	Комплектные тиристорные устройства	35
2	Проблемы электроснабжения буровых установок	35
2.1	Методы повышения показателей системы электроснабжения буровых установок с регулируемым электроприводом	35
2.2	Методика выбора ФКУ для буровых установок	41
2.3	Вариант 1 - ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности в системе электроснабжения буровой установки	42
2.4	Вариант 2 - ФКУ с косвенной компенсацией реактивной мощности	45
2.6	Принцип построения структур систем автоматического регулирования ФКУ с косвенной компенсацией реактивной мощности	48
3	Безопасность и экологичность проекта	52
4	Экономическая эффективность проекта	58
	Заключение	62
	Список используемых источников	63

## Введение

Буровые установки (БУ) предназначены для эксплуатационного бурения нефтяных и газовых скважин забойными двигателями и роторным способом в районах с умеренным климатом. Они выпускаются в виде комплектных машин отечественной промышленностью более 50 лет. Основы создания рациональных систем электропривода на буровых установках были заложены в работах инженеров и ученых ВНИИ Электропривод, ВНИИ Нефтемаша, Уралмаш завода, ВЗБТ. В течение всего этого периода ВНИИ Электропривод, в настоящее время ОАО «Электропривод», выполнял большой объем НИР и ОКР по системам электропривода (ЭП), а также, совместно с рядом электротехнических заводов, производил поставки электрооборудования для этих объектов [4,5,7-9].

Для электроприводов буровых установок характерны напряженные рабочие режимы и тяжелые условия эксплуатации (климатические и механические воздействия, соизмеримая мощность источников электропитания, отдаленность баз обслуживания, отсутствие высококвалифицированных электриков непосредственно на объектах и т.д.). Вместе с тем, к буровым установкам предъявляются высокие требования к бесперебойности работы, поскольку остановки оборудования могут привести к авариям в скважине и крупным экономическим потерям.

Для электроприводов буровых установок, оснащенных тиристорными электроприводами, характерны следующие проблемы: низкий коэффициент мощности (0,5–0,6), заметное увеличение искажения синусоидальности кривой напряжения (суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения может превышать 20%, что значительно выше требований ГОСТ 32144-2013 [3]), значительное снижение напряжения при питании от относительно слабой линии (отклонение напряжения на вводе буровой установки в этом случае достигает минус 15 – 20%). Из-за низкого качества электроэнергии, если не принимать специальных мер, нормальная эксплуатация

буровых установок затруднительна [8].

Решить проблему оптимизации электроснабжения буровых установок с тиристорным электроприводом можно с помощью применения фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) [6].

Проблема оптимизации электроснабжения регулируемых электроприводов БУ ещё более обострилась, когда в целях разведки и освоения более удаленных месторождений возникла необходимость обеспечения работоспособности буровой установки с питанием от существующих маломощных линий 6 кВ длиной до 10 – 12 км, а по возможности большей длины, без строительства новых линий электропередач. Очевидно, эта проблема может быть решена только за счет наиболее рационального выбора ФКУ, что должно обеспечит существенный технико-экономический эффект за счет экономии капитальных затрат.

Целью выпускной квалификационной работы является оптимизация электроснабжения буровой установки с регулируемым приводом на основе применения ФКУ двух типов: со ступенчатым регулированием реактивной мощности и с косвенной компенсацией реактивной мощности.

В соответствии с поставленной целью в работе необходимо решить следующие задачи:

- анализ электропривода буровой установки на примере БУ3900;
- анализ проблем электроснабжения буровых установок;
- разработать методику выбора ФКУ для буровой установки с регулируемым электроприводом;
- установить влияние на показатели эффективности системы электроснабжения буровой установки ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности;
- установить влияние на показатели эффективности системы электроснабжения буровой установки плавно регулируемого ФКУ с косвенной компенсацией реактивной мощности.

# **1 Электропривод постоянного тока буровой установки БУ3900**

## **1.1 Главные механизмы электропривода постоянного тока буровой установки**

Упрощенная схема электроснабжения буровой установки (БУ) на примере буровой установки типа БУ3900/225ЭП – БМЦ показана на рисунке 1.

Основное электроснабжение БУ осуществляется от линии электропередачи 6 кВ. Кроме того, для аварийных режимов предусмотрена дизельная электростанция типа АСДА-200 для аварийного питания. Напряжение 6 кВ через вводные комплектные распределительные устройства типа КРУЭ-6(10) У2В подается на силовые трансформаторы TV1, TV2, вторичные обмотки которых через силовые автоматические выключатели в шкафах ШВГ1, ШВГ2 соединены параллельно и включены на общие шины питания силовых мостов тиристорных преобразователей главных электроприводов.

Структура системы цифрового управления главными приводами буровой установки приведена на рисунке 2.

Главные механизмы БУ – это буровая лебедка для спуска и подъема колонны бурильных труб (КБТ), буровой ротор для вращения КБТ (или силовой вертлюг, имеющий также название «верхний привод»), буровые насосы для обеспечения циркуляции промывочной жидкости. Электрический привод буровых механизмов весьма широко применяется в отечественной практике, в первую очередь в связи с наличием развитых систем централизованного электроснабжения и сравнительной простотой реализации электропривода.

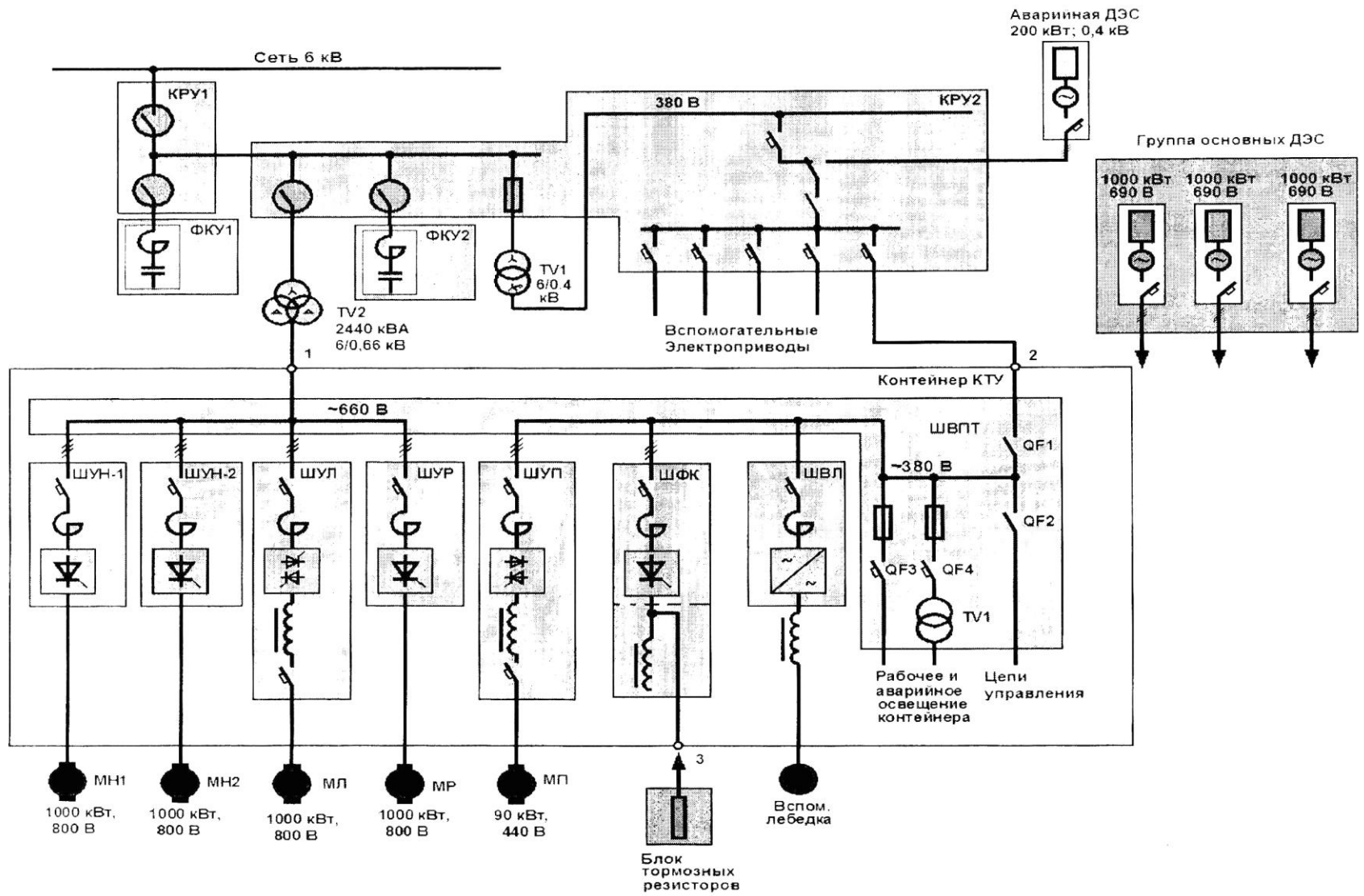


Рисунок 1 - Схема электроснабжения буровой установки БУ3900/225ЭП – БМЦ

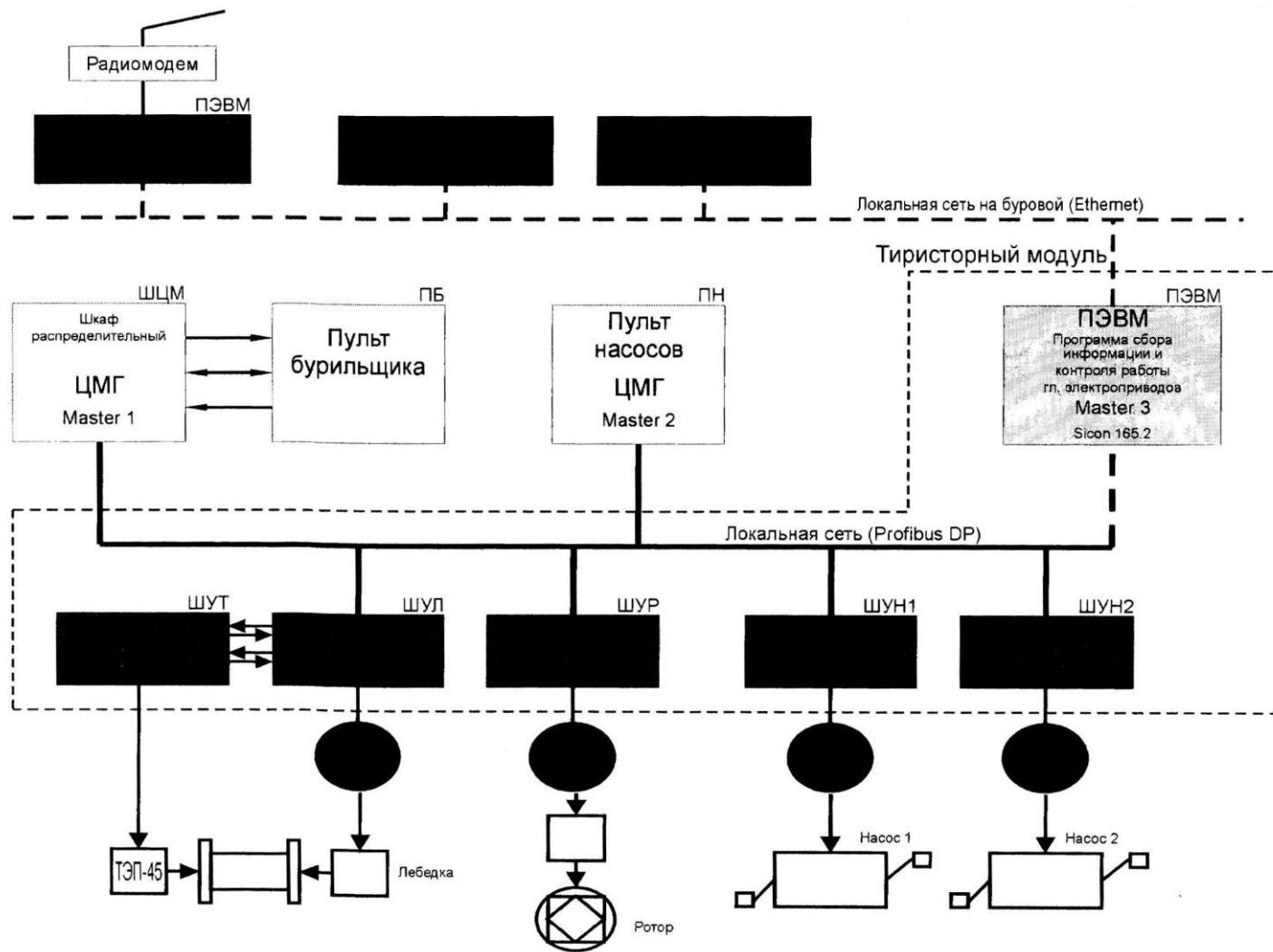


Рисунок 2 - Структура системы цифрового управления главными приводами буровой установки



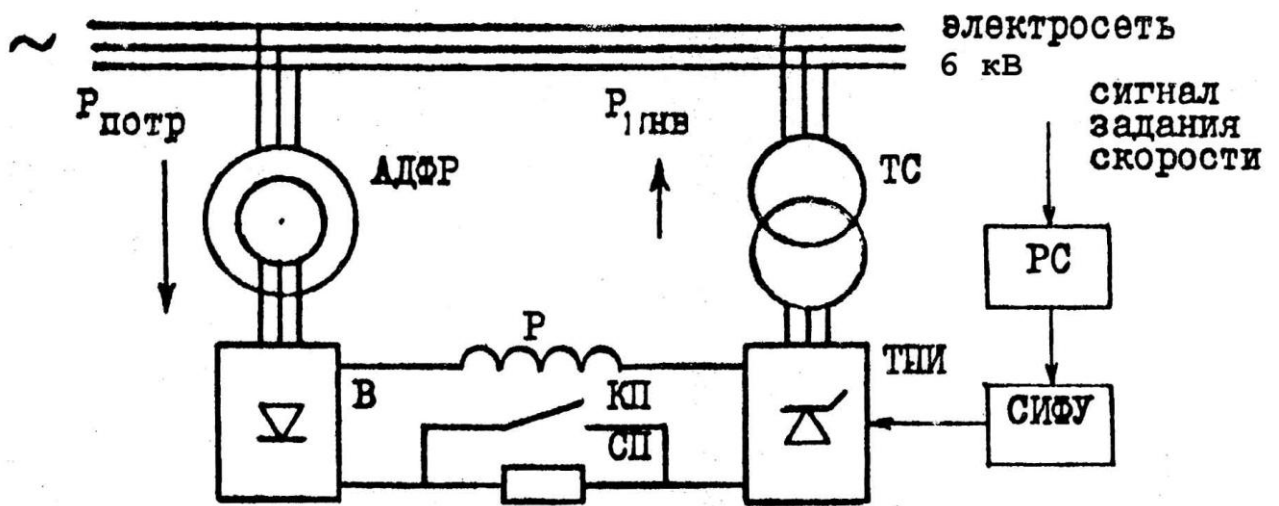
## 1.2 Основные этапы развития электропривода буровых установок

История развития электропривода БУ сложная и извилистая. До начала серийного выпуска буровые установки изготовлялись полукустарным способом, в основном с приводом от дизелей или от асинхронных короткозамкнутых электродвигателей, причем привод выполнялся сначала как групповой. Поэтому первые промышленные электрические БУ (с питанием от централизованных электрических сетей) имели нерегулируемый электропривод от асинхронных и синхронных электродвигателей, обладающий жесткими механическими характеристиками и лишь в минимальной степени отвечающий требованиям технологии бурения.

В связи с этим уже в 1960-х годах начались работы по созданию регулируемых электроприводов для БУ. Теоретически и экспериментально было доказано, что регулируемый электропривод обеспечивает наиболее полное использование мощности буровых механизмов, возможность реализации оптимальных режимов бурения, сокращение аварийности, повышение показателей бурения в целом [11,20].

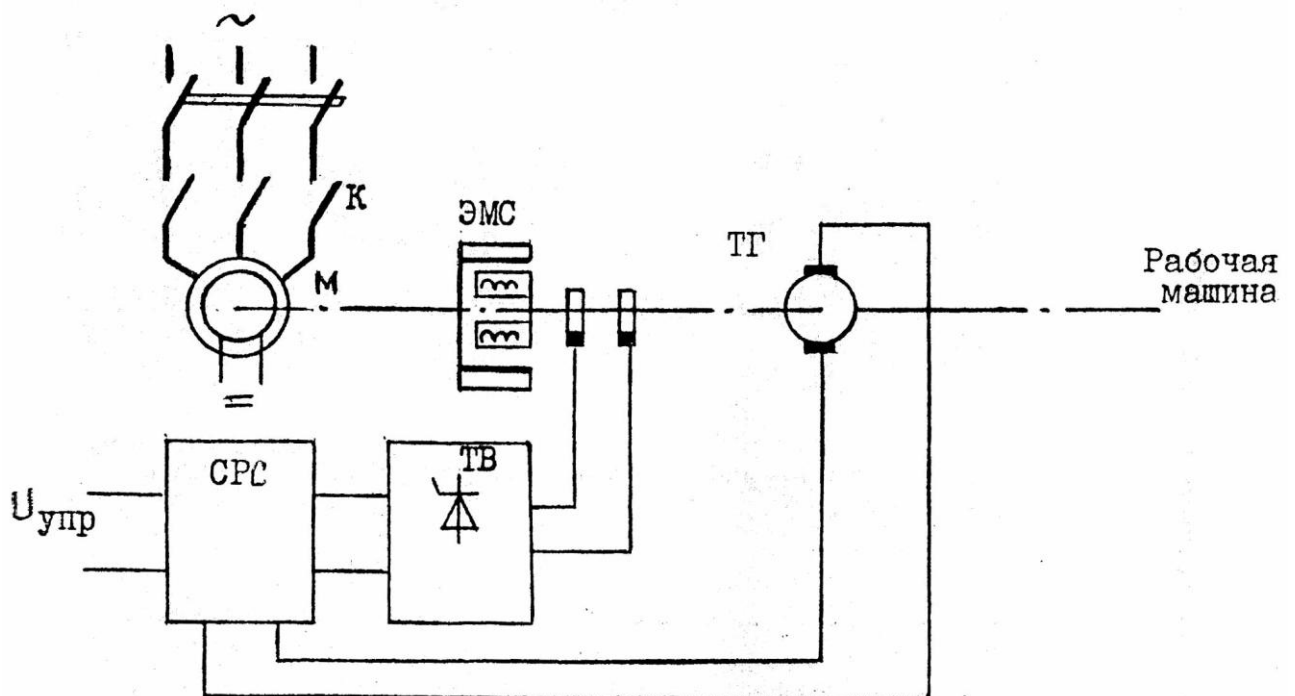
В разные периоды времени разрабатывались и выпускались электроприводы на тех средствах регулирования, которые были доступны: схемы с реостатным пуском, привод с электромагнитными и гидравлическими муфтами скольжения, асинхронные каскады и т.д. (рисунок 3) [9]. Но все это представляло собой временные решения.

Кардинальным решением было использование комплексного электропривода системы «генератор - двигатель постоянного тока» (Г-Д), который впервые был применен в 1960 г. на установке «Уралмаш -11ДЭ» (проходившей испытания в районе г. Отрадный, Самарская область), а затем на известных буровых БУ-300Э, БУ-300 ДЭ с номинальной грузоподъемностью 300 тс (максимальная - 400 тс) [9]. Схема силовых цепей системы Г-Д на примере установки БУ-300 ДЭ показана на рисунке 4.



а) типовая схема электропривода системы АВК переменного тока

АДФР – асинхронный двигатель с фазным ротором, В – выпрямитель (неуправляемый), Р – реактор, СП – сопротивление пусковое, КП – контактор пусковой, ТПИ – тиристорный преобразователь, СИФУ – система импульсно-фазового управления, РС – регулятор скорости



б) схема электропривода лебедки с электромагнитной муфтой

М – синхронный двигатель, ЭМС – электромагнитная муфта, ТГ – тахогенератор, ТВ – Тиристорный возбудитель муфты, СРС – системы регулирования скорости привода

Рисунок 3 - Схемы некоторых «старых» систем электропривода буровых установок

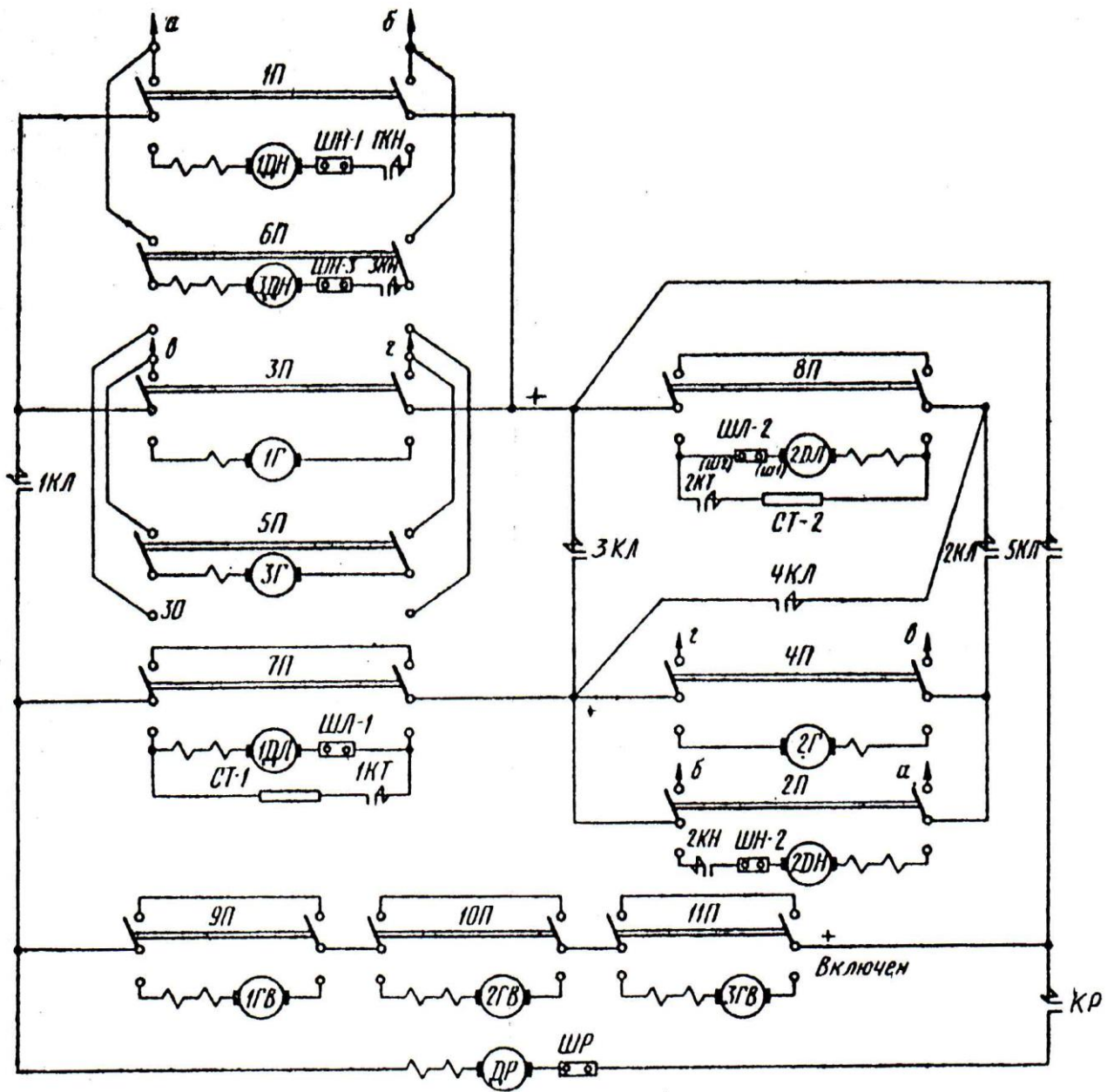


Рисунок 4 - Схема силовых цепей главных электроприводов буровой установки «Уралмаш – 300ДЭ» (система Г – Д)

1Г – 3Г – главные генераторы; 1ГВ – 3ГВ – вспомогательные генераторы; 1ДН – 3ДН – электродвигатели насосов; 1ДЛ, 2ДЛ, ДР – электродвигатели лебедки и ротора; 1КН – 3КН, 1КЛ – 5КЛ, КР – силовые контакторы

Система Г-Д представляет собой классическую, замечательную систему по сочетанию таких важнейших качеств, как большой диапазон регулирования скорости, полная чистота в смысле электромагнитной совместимости, отличные энергетические показатели, свободное управление во всех четырех квадрантах поля механических характеристик, в двигательных и рекуперативных (тормозных) режимах.

Система Г-Д имеет некоторые свои неотъемлемые естественные особенности (как-то наличие коллектора и щеточного аппарата, определенные ограничения по максимальному моменту двигателя, относительно большая масса машин), которые, на наш взгляд - несправедливо, принято называть «недостатками». Тем не менее, эта система обеспечила работу ряда тяжелых БУ с высокими эксплуатационными показателями в течение многих лет. В том числе система Г-Д успешно действовала на известной установке Уралмаш - 15000 «Кольская», пробурившей ультра - глубокую научно - исследовательскую скважину глубиной более 12000 м, что явилось мировым рекордом, который до настоящего времени никем не перекрыт [9].

Применение регулируемого электропривода, при нормальном взаимодействии с разработчиками - машиностроителями, позволяет значительно усовершенствовать конструкцию буровых механизмов.

Как видно из рисунка 4, при использовании системы Г-Д требуется большое количество генераторов и переключающих аппаратов, что определяется многообразием режимов работы приводов в разных сочетаниях (но это не связано с фактической мощностью электроприводов). Поэтому на установках относительно небольшой грузоподъемности система Г-Д не применялась в связи с высокой стоимостью, большой массой и габаритами электромашинных преобразовательных агрегатов.

В последующие годы освоение производства мощных тиристорных и достаточно надежных систем управления позволило начать переход к применению тиристорного электропривода.

В таблице 1 приведены параметры электропривода постоянного тока

главных механизмов. В таблице 2 – основные типы электрических машин, применяемых в электрических приводах постоянного тока. В таблице 3 – номенклатура комплектных устройств электроприводов постоянного тока БУ.

Таблица 1 - Параметры электропривода главных механизмов БУ

Наименование электропривода	Основные характеристики	
	ВЗБТ	Уралмаш
Электропривод буровой лебедки	Одновигательный Нереверсивный Реверсивный 2-х квadrантный Двухзонный 560 – 750 кВт	Одновигательный Двухдвигательный Реверсивный 4-х квadrантный Двухзонный 1000 кВт
Система торможения	От электромагнитных тормозов Система динамического торможения	Система рекуперативного торможения Система инверторного торможения
Электропривод регулятора подачи долота	Реверсивный 4-х квadrантный Двухзонный 65 кВт	Реверсивный 4-х квadrантный Двухзонный 90 кВт
Электропривод роторного стола	С неоперативным реверсом поля Двухзонный 150 – 630 кВт	С неоперативным реверсом поля Однозонный 150 – 630 кВт
Электропривод бурового насоса	Нереверсивный Двухзонный 560 – 750 кВт	Нереверсивный Однозонный 560 – 750 кВт

Таблица 2 - Основные типы электрических машин, применяемых в электрических приводах постоянного тока на БУ

Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Скорость, об/мин	Механизмы	Изготовитель
Электродвигатели постоянного тока					
4ПС-450-1000УХЛ2	1000	800	1000/1500	Лебедка Насосы Ротор	Электросила
ДПП-55/50 4К УХЛ2	1000	8000	1000/1500	Лебедка Насосы Ротор	Уралэлектротяжмаш
4ПБ-450-750 УХЛ3	750	800	1000/1500	Лебедка Насосы	Электросила
4ПП-355-630 УХЛ3	630	800	650/1300	Ротор	Электросила
МПЭ-500-500 УХЛ3	560	440	500/1000	Лебедка Насосы	Электросила
4ПЭ-450-800 УХЛ2	560	440	375/1000	Лебедка	Электросила
МПБ-90-1000 УХЛ3	90	440	1000/2000	РПД	Электросила
МПБ-65-1000 УХЛ3	65	440	1000/2000	РПД	Электросила
Электромагнитные тормоза					
ТЭИ 710x45 У1	710	110	500	Лебедка	КЭМЗ
ТЭП 45	450	220	500	Лебедка	КЭМЗ

Таблица 3 - Номенклатура комплектных устройств электроприводов постоянного тока БУ

Группа	Наименование	Параметры	Количество типов	Количество модификаций
Тиристорные преобразователи	Преобразователи нереверсивные	460 В; 800 В; 400 – 1500 А	6	22
	Преобразователи реверсивные	460 В; 800 В; 160 – 1500 А	4	6
	Тиристорные возбудители	150 В; 15 – 150 А	2	5
	Итого		12	33
Фильтро-компенсирующие устройства		380 В; 660 В; 400 – 1600 А	2	6
Шкафы силовые вспомогательные	Шкафы ввода и распределительные шкафы	380 В; 660 В; 440 В; 800 В; 1000 – 2500 А	5	42
	Шкафы с аппаратурой	380 В; 800 В; 1000 – 1500 А	4	4
	Итого		9	46
Шкафы управления вспомогательные	Шкафы связи и питания	380 В	6	8
	Шкафы контроллеров	380 В	2	2
	Итого		8	10
Пульты управления		110 В; 380 В	10	20

### 1.3 Тиристорный электропривод буровых установок

Известные преимущества электропривода системы «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока» (ТП-Д) по сравнению с электроприводом системы Г-Д (отсутствие электромашинного преобразовательного агрегата, более высокие КПД и быстродействие, значительное снижение габаритов и массы электрооборудования) привели к применению этого нового вида привода на БУ.

В 1970-х годах ВНИИ Электропривод, совместно с Уралмашзаводом и рядом электротехнических предприятий, после выполнения научно-исследовательских и опытных работ, создали электропривод ТП-Д для морских буровых установок [11].

Затем тиристорный привод начали использовать на наиболее тяжелых БУ. Современная типовая схема электропривода БУ3900 приведена на рисунке 5. В связи с некоторыми особенностями БУ (разновременность работы электроприводов, необходимость унификаций электрических и дизель-электрических установок) на БУ используется схема питания всех тиристорных приводов от общих шин переменного тока, и соответственно используются только трехфазные «шестипульсные» схемы ТП.

При эксплуатации таких приводов встретились с большими трудностями, связанными с тяжелыми условиями эксплуатации (температура внешней среды и т.п.). Благодаря экстремальным усилиям ВНИИ Электропривод, была реализована выработанная еще раньше концепция - контейнерное исполнение комплекта тиристорных устройств. Именно это дало решающий импульс к широкому внедрению системы ТП-Д. В результате с 1995 г. практически все выпускаемые БУ с электроприводом оснащаются системой ТП-Д. Одновременно доля установок с электроприводом в общем парке БУ повысилась до 70 % (остальные установки имеют дизельный привод).



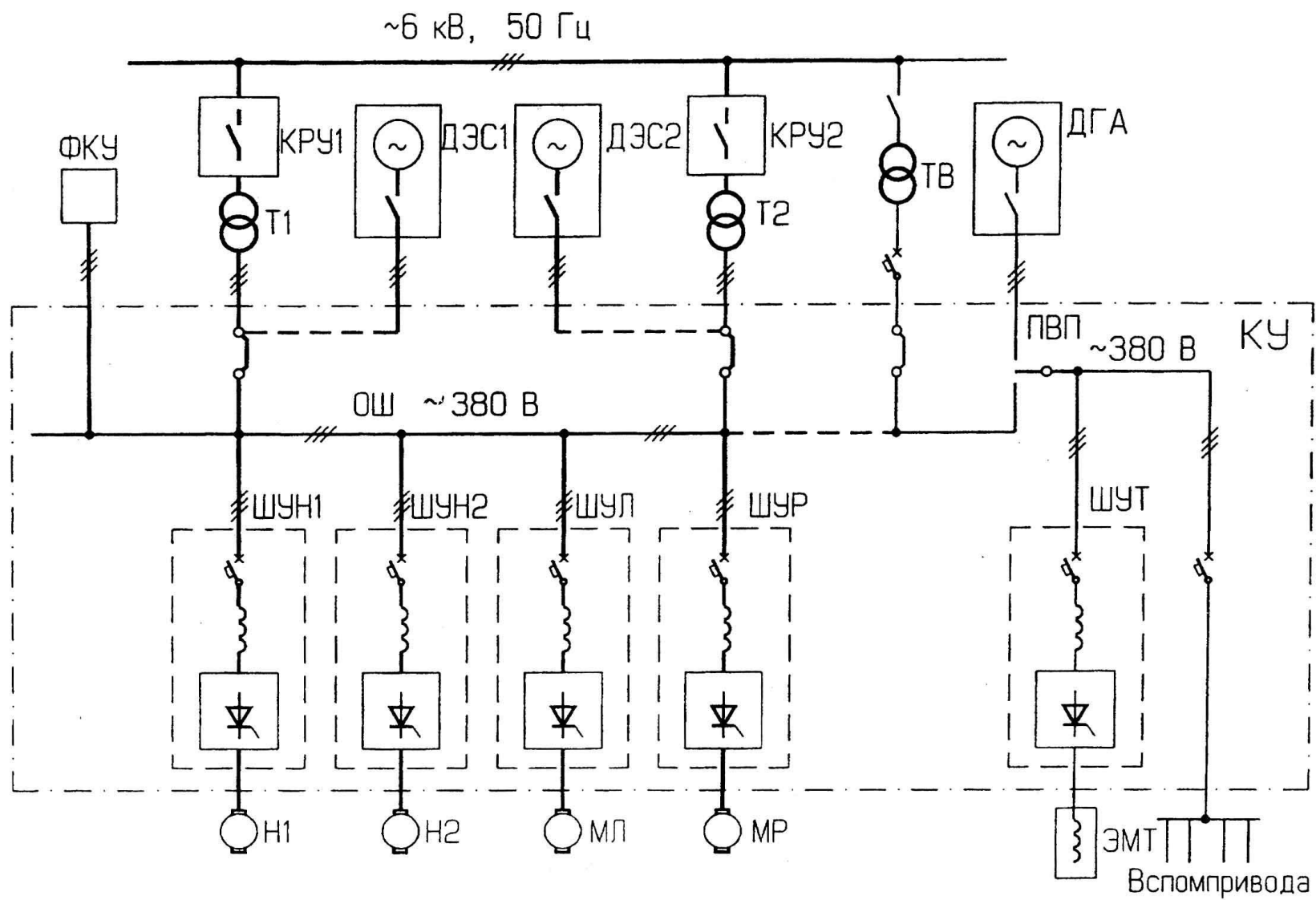


Рисунок 5 - Типовая схема электропривода буровой установки БУ3900

На электрических БУ предусматривается обычно один или два главных силовых трансформатора, на их вторичной стороне образуются общие шины переменного тока (ОШ). На большинстве действующих отечественных БУ применяется напряжение общих шин 380 В, на более мощных БУ применяется напряжение 660 В. От тех же общих шин, непосредственно или через согласующий трансформатор, питаются все вспомогательные потребители. На каждой БУ, независимо от основного источника питания главных электроприводов, имеется аварийный дизель-генератор относительно небольшой мощности.

На дизель-электрических БУ питание на общие шины подается от двух или трех главных дизель – электростанций (ДЭС) при их параллельной работе (на рисунке 5 показано пунктиром). Тем самым, обеспечивается полная унификация электроприводов и бурового оборудования для электрических и дизель - электрических БУ, разница имеется только в системе электропитания. Эта унификация имеет существенные преимущества для производства и эксплуатации установок.

Для управления главными электроприводами много лет использовались аналоговые системы управления. В настоящее время разработаны и применяются современные цифровые (микропроцессорные) системы управления, выполняющие функции системы фазоимпульсного управления ТП, контроля, автоматического регулирования и диагностики параметров электропривода. В обоих случаях системы регулирования построены на известных принципах систем «подчиненного регулирования параметров» (другое название – «системы с последовательной коррекцией»).

Главными недостатками системы ТП-Д являются пониженный средний коэффициент мощности и повышенное содержание высших гармоник, попадающих в питающую электрическую сеть. Тем не менее, система ТП-Д широко используется в нашей стране и за рубежом, а для устранения указанных недостатков применяются фильтро-компенсирующие устройства (ФКУ).

## 1.4 Электропривод буровой лебедки

Проектирование конструкции лебедки и ее привода представляет собой сложную многофакторную задачу. Ряд конструктивных схем электропривода лебедки показан на рисунке 6. В течение многих лет использовались разные многоскоростные лебедки, сложные и громоздкие (например, рисунки 6а, 6б, 6д, 6е).

Благодаря применению регулируемого электропривода, для установок БУ-300 была создана оригинальная двухскоростная лебедка по рисунку бж (изобретение Уралмашзавода и ВНИИ Электропривод), которая и до настоящего времени используется на самых тяжелых БУ. Было доказано, что применение двухскоростных буровых лебедок вообще наиболее целесообразно, и они получили у нас широкое распространение (тогда как за рубежом к этому пришли значительно позднее). Для БУ меньшей грузоподъемности используется лебедка, близкая к схеме рисунку бг, с тем отличием, что тормоз устанавливается на валу барабана.

Можно отметить, что «революционная» односкоростная лебедка на БУ-11ДЭ (рисунок бк) по ряду причин признана неперспективной.

Естественно, что во всем диапазоне нагрузок желательно полностью использовать мощность привода, а для этого характеристика электропривода должна иметь вид кривой на рисунке 7а, где участок АВС является кривой постоянства мощности. Весьма желательно, чтобы подъем наибольшего груза на данной передаче производился при номинальных значениях напряжения и скорости двигателя, т.е. точки В и С должны быть близкими (или вообще сливались в одну точку). Тогда будут получены лучшие результаты, как по токовым нагрузкам, так и по энергетическим показателям.

При той же характеристике собственно привода, грузоподъемная характеристика, изображенная на рисунке 7(б) условно для трех передач, будет представляться на средней передаче кривой 1, а общая характеристика – кривой 2.

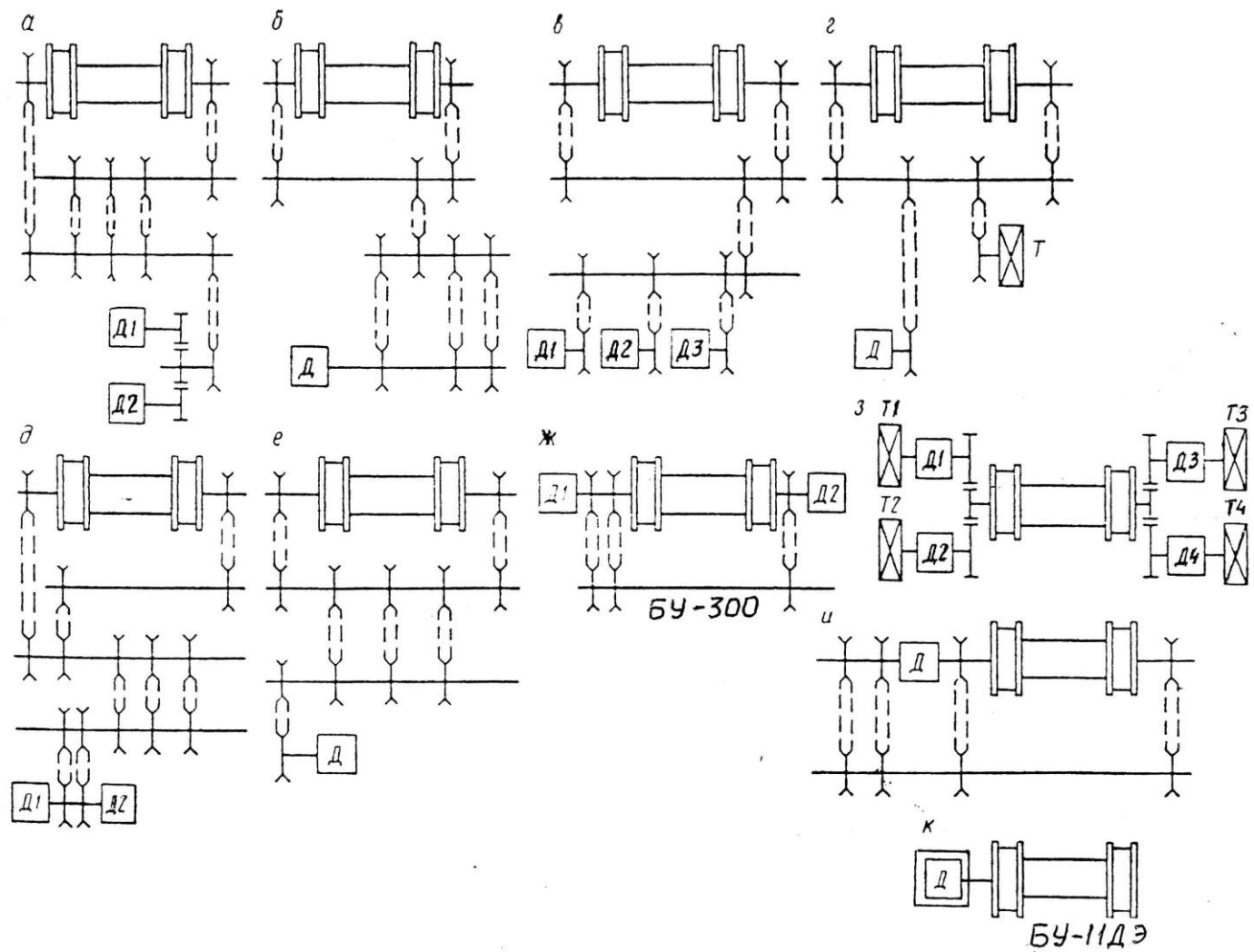
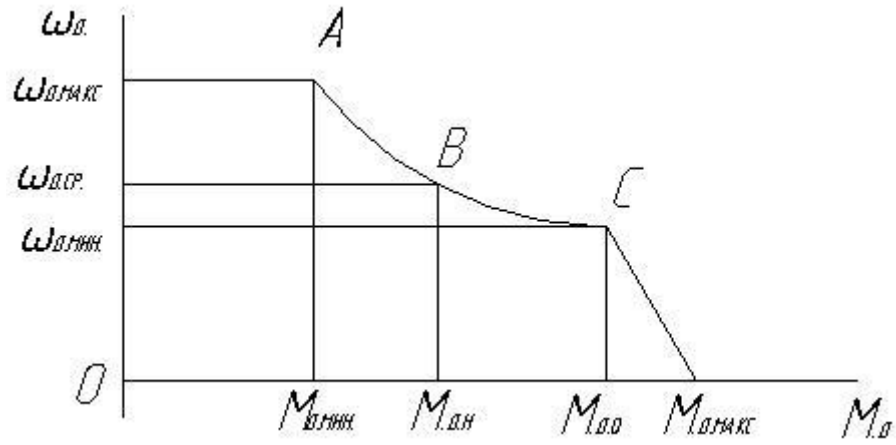
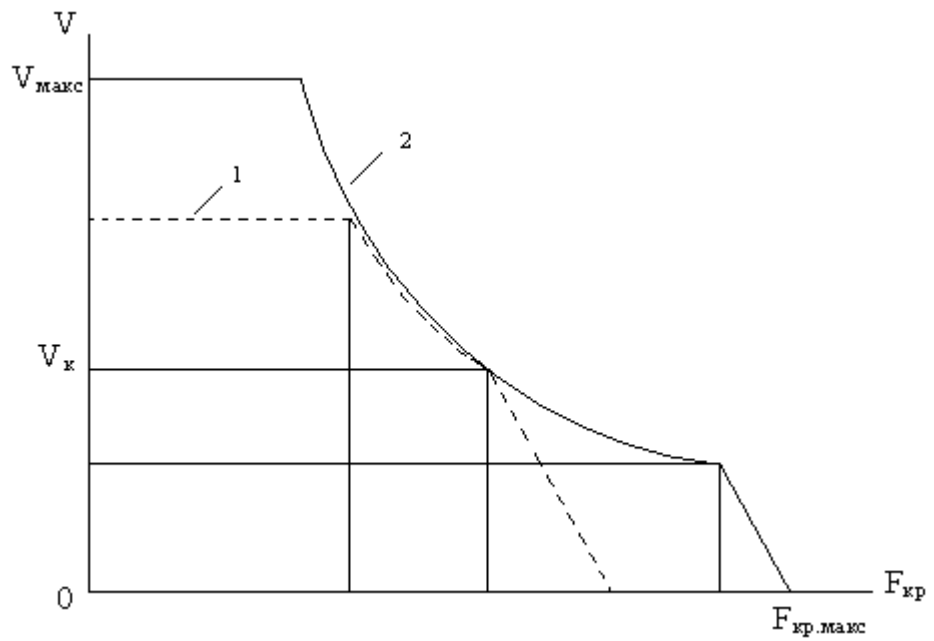


Рисунок 6 - Конструктивные схемы буровых лебедок



а)



б)

Рисунок 7 - Характеристики электропривода (а) и лебедки (б) в режиме подъема

Весьма желательно также, чтобы характеристики на смежных передачах хорошо стыковались друг с другом, а общая характеристика не имела «провалов».

В настоящее время в большинстве буровых лебедок используется нереверсивный электропривод, обеспечивающий режимы подъема; для торможения при спуске устанавливается электромагнитный тормоз. Для этой цели специально были разработаны и производятся электромагнитные тормоза нескольких типов.

Структурная схема нереверсивного электропривода лебедки с двухзонным управлением, включая систему автоматического регулирования (САР), показана на рисунке 8. Схема основана на стандартной системе с регуляторами тока и скорости. Особенностью являются узлы, обеспечивающие автоматическое управление скоростью в зависимости от веса по закону постоянства мощности. Структурная схема в принципе справедлива в равной степени для устройств аналогового и цифрового управления.

На новых БУ Уралмашзавода не устанавливаются электромагнитные тормоза для спуска КБТ в скважину, вместо этого предусматривается реверсивный привод, с зубчатым редуктором и постоянно включенными механическими передачами [9]. Для такой системы характерен большой суммарный момент инерции, и из-за этого будут затянuty процессы замедления при подъеме и разгона при спуске порожнего талевого блока и колонны бурильных труб (КБТ) небольшого веса.

При подъеме КБТ двигатель работает в 1-м квадранте (рисунок 9). При спуске двигатель работает в генераторном режиме рекуперации (4-й квадрант), тиристорный преобразователь действует в «инверторном» режиме и отдает энергию спуска в питающую электрическую сеть.

В переходных режимах электропривод кратковременно должен переходить: в период замедления при подъеме – во 2-й квадрант; в период разгона при спуске КБТ - в 3-й квадрант, благодаря чему процессы происходят достаточно быстро.

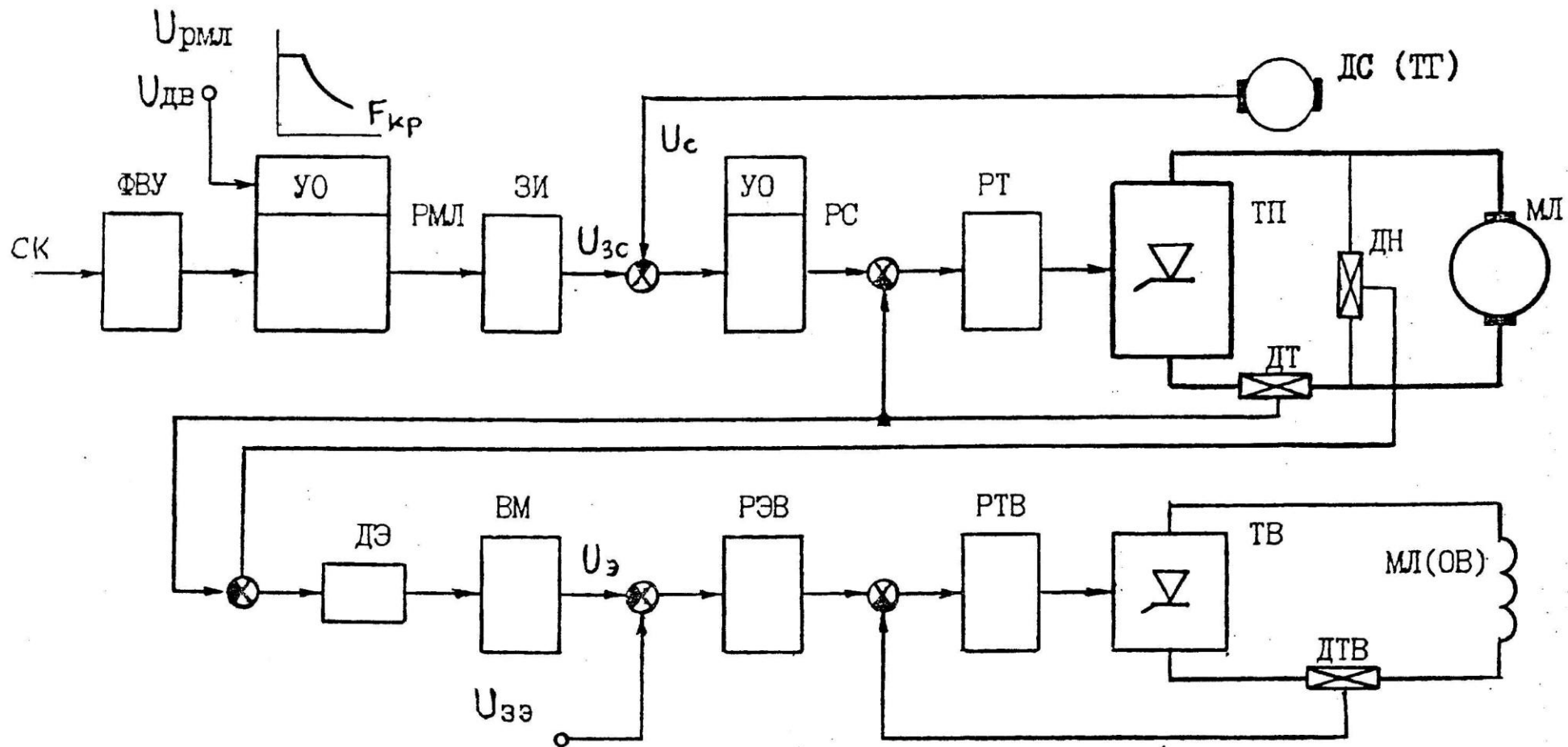


Рисунок 8 - Структурная схема электропривода лебедки

СК – сельсинный командоаппарат; ФВУ – фазочувствительное выпрямительное устройство; РМ – регулятор мощности; УО – узел ограничения; ЗИ – задатчик интенсивности; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока якоря; ТП – Тиристорный преобразователь; МЛ – двигатель лебедки; ДС (ТГ) – датчик скорости (тахогенератор) лебедки; ДН – датчик напряжения якоря; ДТ – датчик тока якоря; ДЭ – датчик ЭДС двигателя; ВМ – узел выделения модуля; РЭВ – регулятор ЭДС по цепи возбуждения двигателя; ТВ – Тиристорный возбуждатель; ДТВ – датчик тока возбуждения; ОВ – обмотка возбуждения

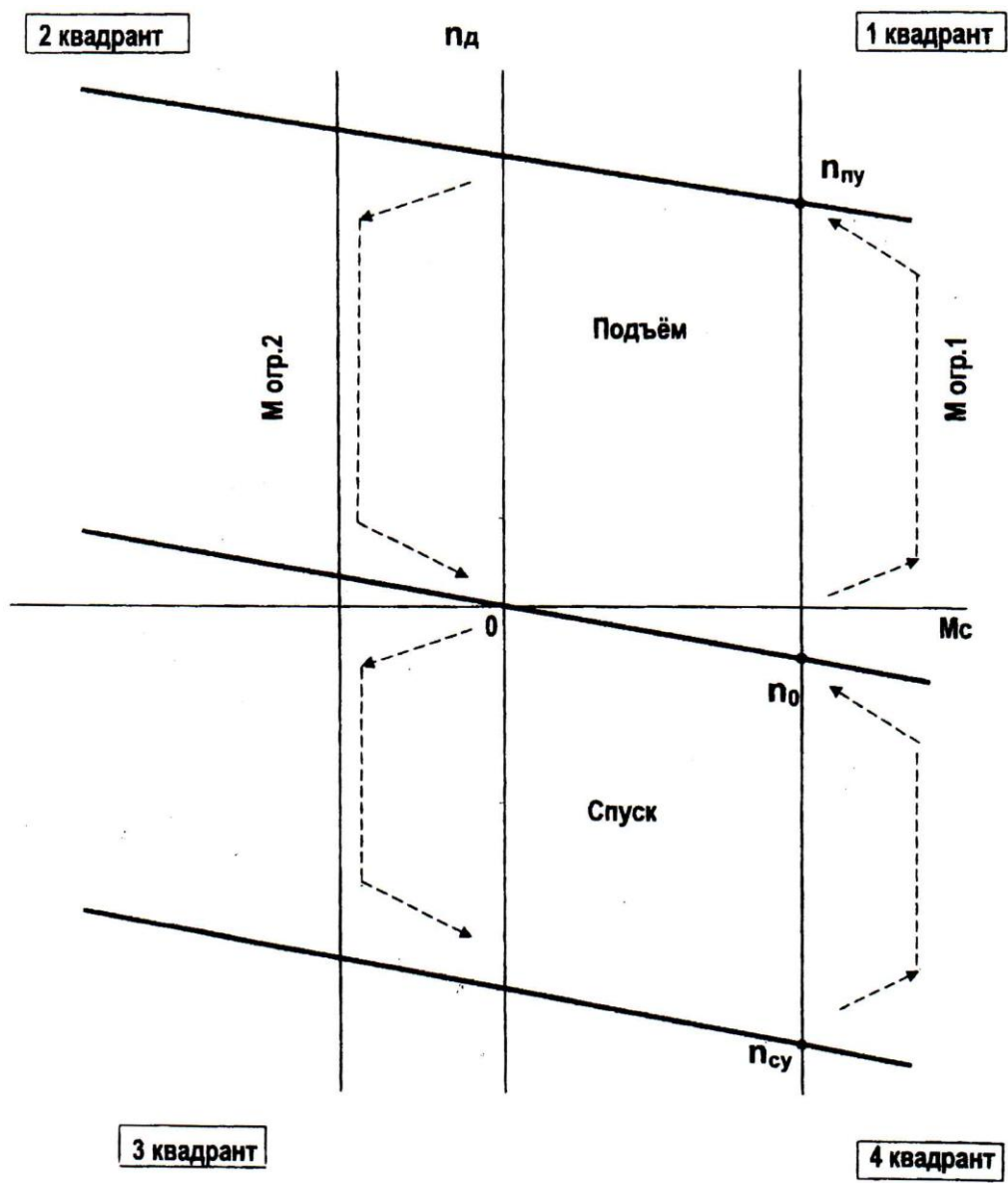


Рисунок 9 - Характеристики электропривода лебедки



В этих процессах ток якоря двигателя должен изменять свое направление, что и определяет необходимость в применении реверсивного ТП. В этом варианте возникают проблемы, связанные с возможным опрокидыванием и прорывом инвертора, а соответственно нужно решать задачи эффективной быстродействующей защиты ТП.

К настоящему моменту, к сожалению, отсутствуют серьезные эксплуатационные данные, которые позволили бы провести технико-экономическое сравнение систем нереверсивного и реверсивного электроприводов лебедки.

Электропривод регулятора подачи долота (РПД), несмотря на относительно небольшую мощность, по своей структуре близок к реверсивному приводу лебедки и поэтому подробнее не рассматривается. Отметим лишь следующие особенности электропривода:

- для работы в автоматическом режиме бурения предусматривается дополнительный контур регулирования усилия на крюке, точнее говоря, поддержания заданного постоянного усилия на крюке, а соответственно и нагрузки на долото;

- в тех же целях необходимо подавать в систему управления РПД сигнал по усилию на крюке с наибольшей возможной точностью, для чего такой сигнал должен выдаваться из системы контроля процессов бурения.

## 1.5 Электропривод ротора

Номинальная мощность привода ротора должна соответствовать стандарту на БУ: для глубин скважин от 1600 до 5000 м мощность должна быть от 180 до 370 кВт. Нормируемыми данными, которые должны содержаться в ТЗ на разработку привода ротора, являются также:

- максимальная скорость при минимальном моменте;
- максимальный вращающий момент при нулевой скорости (стопорный момент, развиваемый кратковременно);
- наибольшие рабочий момент и скорость ротора в длительных режимах.

Иллюстративные характеристики электропривода ротора показаны на рисунке 10. Обычно предусматриваются 2 режима управления ротором.

В режиме максимального момента характеристика имеет вид кривой 1, при этом максимальный «стопорный» момент достигается в точке В1. В режиме минимального момента вводится в действие дополнительное жесткое ограничение момента (кривая 2, участок А - В2). Из графиков видно, что в этом случае максимальный «стопорный» момент ротора уменьшается (точка В2).

В обоих режимах привод обеспечивает плавное регулирование скорости во всем диапазоне от нуля до номинальной скорости (точка А) и далее до максимальной скорости (точка С). Участок А - С линейный, однако мощность на нем достаточно близка к постоянной. В схеме может быть предусмотрено и точное поддержание постоянной мощности, но обычно в этом нет необходимости.

Возможно, осуществить также плавное или «многоступенчатое» изменение уставки ограничения максимального момента с пульта бурильщика, однако это приводит к нежелательному усложнению схемы.

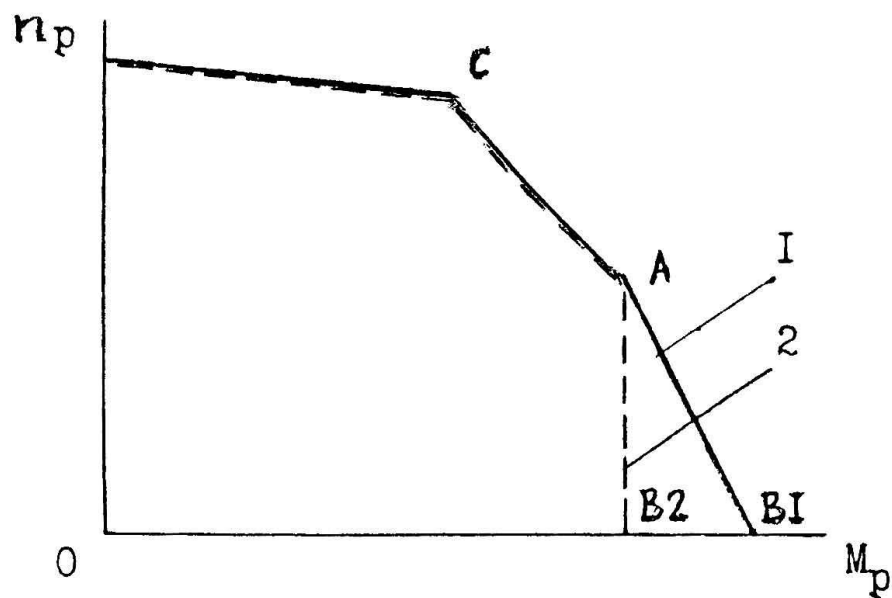


Рисунок 10 - Характеристики электропривода ротора

В настоящее время, благодаря регулируемому электроприводу, механическая передача ротора выполняется, как правило, односкоростной. Требуемая характеристика электропривода ротора в этом случае повторяет характеристику ротора по рис. 10, только в другом масштабе.

Возникает принципиальный вопрос: как выбирать номинальную скорость двигателя и передаточное число механической передачи. Наиболее рационально, чтобы в точке А (рис. 10) двигатель в номинальном режиме, а регулирование скорости до максимальной осуществлялось во 2-й зоне, т.е. за счет ослабления поля двигателя. Тогда электропривод ротора будет иметь наилучшие энергетические показатели. Для этого необходима установка внешнего редуктора с соответствующим передаточным числом, что и выполняется на установках ВЗБТ.

Известны также конструкции «безредукторного» привода ротора («Уралмашзавод») [9]. В этом случае номинальная скорость двигателя соответствует, приблизительно, максимальной скорости ротора, и все регулирование осуществляется в 1-й зоне, т.е. за счет изменения напряжения якоря. По нашему мнению, при этом определенным образом ухудшаются

энергетические показатели.

Упрощенная структурная схема электропривода ротора, включая систему автоматического регулирования (САР), показана на рисунке 11. Эта схема основана на стандартной системе с регуляторами тока и скорости. Тиристорный преобразователь питания якоря - нереверсивный. При необходимости, в некоторых редких случаях, вращения ротора в «левом» направлении, путем оперативного управления с пульта, что производится путем переключения полярности тока возбуждения (соответствующие аппараты на упрощенной схеме рисунке 9 не показаны).

Особенностью САР является узел ограничения УО на выходе регулятора скорости РС, обеспечивающий наклонный участок характеристики А - В1 по рисунку 10. Такая форма характеристики целесообразна для привода ротора, т.к. позволяет снизить динамические перегрузки в приводе и в бурильных трубах при внезапном возрастания момента, что бывает в сложных условиях бурения.

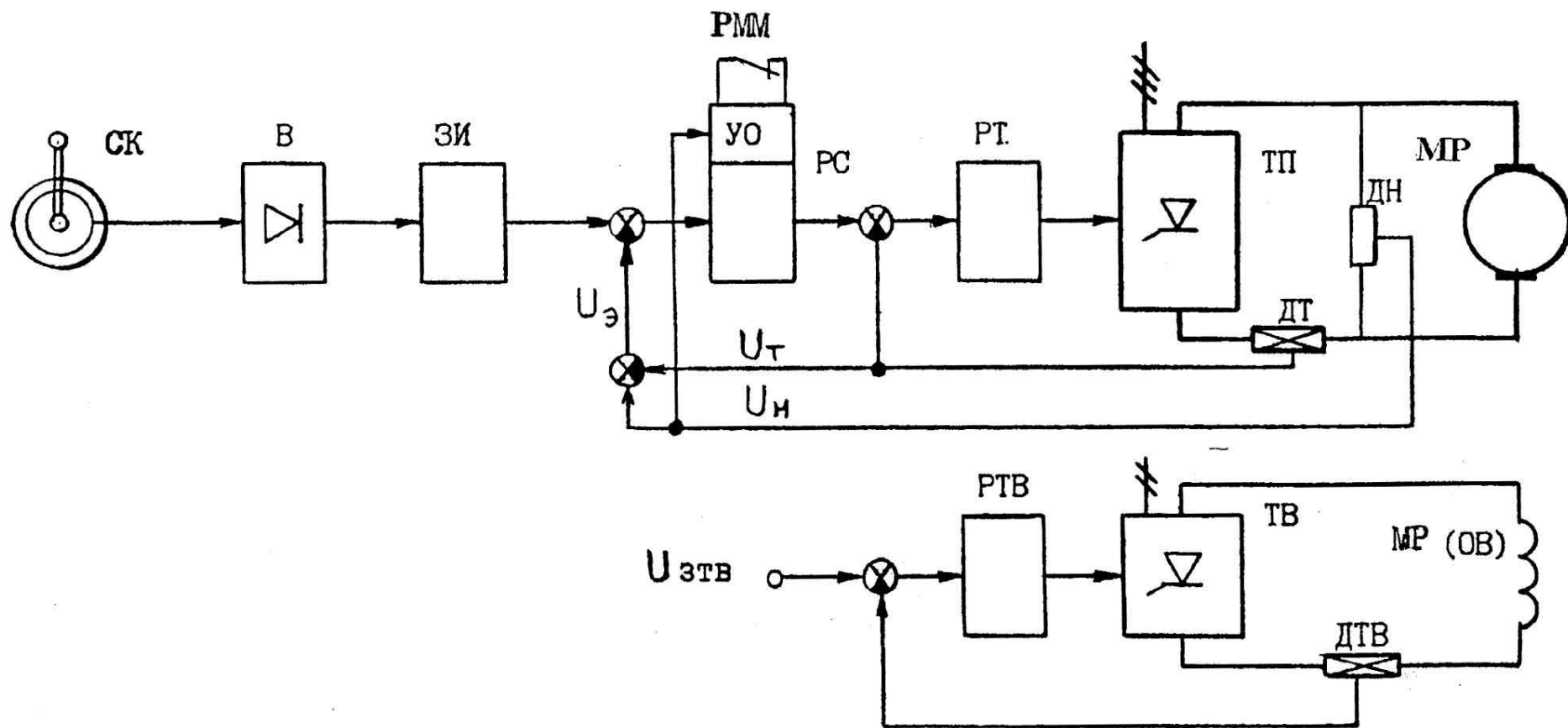


Рисунок 11 - Структурная схема электропривода ротора

СК – сельсинный командоаппарат; В – выпрямитель; ЗИ – задатчик интенсивности; РС – регулятор скорости; УО – узел ограничения; РТ – регулятор тока якоря; ТП – Тиристорный преобразователь; МР – электродвигатель ротора; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока якоря; ТВ – тиристорный возбудитель; ДТВ – датчик тока возбуждения; ОВ – обмотка возбуждения; РММ – реле максимального момента

## 1.6 Электропривод насоса

Главными параметрами, определяющими режимы работы насоса, являются давление на выходе насоса  $P$  и подача  $Q$  - количество жидкости, подаваемой в единицу времени (иногда используются термины: производительность, расход насоса). Выходная гидравлическая (полезная) мощность насоса определяется произведением указанных двух параметров. Этому соответствует определенная приводная мощность (на приводном валу) насоса, которая считается его паспортной мощностью и указывается в типовом обозначении насоса.

Буровые насосы снабжаются сменными поршнями и втулками ряда диаметров. Использование сменных поршней и втулок разных диаметров представляет собой по существу ступенчатое регулирование выходных параметров насоса. С этим связаны следующие закономерности. По условиям прочности механизмов насоса (штоки, подшипники, зубчатые передачи) усилия в этих механизмах должны быть равными при разных диаметрах поршней. Исходя из соблюдения этого условия, при меньшем диаметре допускается более высокое давление на выходе насоса – обратно пропорционально площади поршня.

Вместе с тем, при уменьшении диаметра поршня и той же скорости его движения, подача изменяется прямо пропорционально площади поршня (снижается). Таким образом, при смене диаметра мощность сохраняется.

Мощность насосов выбирается из условий турбинного бурения, где требуется наибольшая мощность. На БУ различных классов номинальная приводная мощность одного насоса составляет от 300 до 950 кВт (на тяжелых установках – до 1180 кВт). Номинальная частота вращения двигателя выбирается обычно от 500 до 1000 об/мин.

С точки зрения анализа режимов работы привода, можно отметить следующие особенности поршневого насоса при неизменном диаметре поршней [12]:

- усилия в механизмах насоса и вращающий момент на приводном валу прямо пропорциональны фактическому давлению;

- подача насоса прямо пропорциональна скорости привода.

В процессе проектирования возникает сложный вопрос выбора номинальной скорости двигателя и передаточного числа механической передачи.

Заводом ВЗБТ с участием ОАО «Электропривод» насосы в сочетании с электроприводом разработаны таким образом, что номинальной скорости двигателя соответствует скорость насоса приблизительно на 60 % [11].

Характеристика одного из насосов в относительных единицах  $p^* = f(Q^*)$ , справедливая для любого диаметра поршней, приведена на рисунке 12.

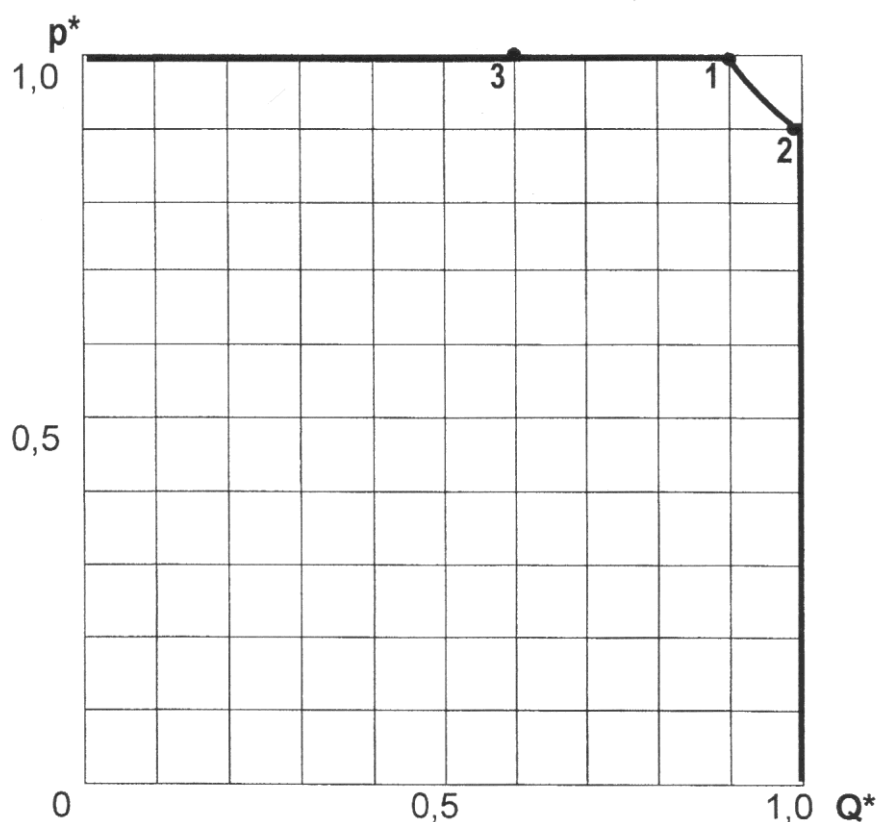


Рисунок 12 - Характеристика насоса  $p^* = f(Q^*)$  в относительных единицах

В результате этого регулирование скорости насоса от 0 до 60 % (до точки 3 рис. 10 производится при работе двигателя в 1-й зоне), а далее от 60 % до 100 % (от точки 3 до точки 2), т.е. в основных рабочих режимах – при работе двигателя во 2-й зоне. Тем самым, достигается возможное улучшение энергетических показателей.

В электроприводе насосов поставки «Уралмашзавод» номинальной скорости двигателя соответствует скорость насоса 100 %, т.е. может осуществляться только однозонное регулирование. В связи с этим в реальных рабочих режимах, когда скорость двигателя ниже номинальной, энергетические показатели снижаются.

Вместе с тем следует отметить, что переход на двухзонное регулирование является непростой задачей и требует, доработки конструкции насоса и его привода, а возможно и замены типа электродвигателя.



## 1.7 Комплектные тиристорные устройства

За последние годы более 40 буровых установок оснащены комплектными тиристорными устройствами (КТУ) с цифровым управлением. В 2006-2008 гг. ОАО «Электропривод», с учетом опыта эксплуатации и имевшихся замечаний, выполнил разработку новых усовершенствованных моделей КТУ, имеющих следующие основные отличия [8]:

- улучшение конструкции, уменьшение габаритов;
- наличие модификаций с односторонним и двухсторонним обслуживанием;
- применение цифровых модулей управления Simoreg CM (фирма Siemens);
- применение цифровых модулей ЦМГ связи с объектом (ОАО «Электропривод»);
- расширение систем защиты, диагностики и информатизации;
- применение современных устройств защиты от перенапряжений;
- повышение эргономических качеств, и др.

Таким образом, высокая степень отработки электроприводов постоянного тока и реализуемое в настоящее время значительное повышение его качества, позволяют сделать вывод, что в ближайшие годы на буровых установках целесообразно применение этого вида электропривода. Одновременно необходимо проведение научно – исследовательских и опытно – конструкторских работ по частотно – регулируемому электроприводу переменного тока, причем в результате его технические характеристики должны достигнуть показателей электропривода постоянного тока, а стоимостные должны приблизиться к конкурентоспособному уровню.

## 2 Проблемы электроснабжения буровых установок

### 2.1 Методы повышения показателей системы электроснабжения буровых установок с регулируемым электроприводом

Для буровых установок, оснащённых регулируемым электроприводом по системе ТП-Д, характерно следующее:

- низкий коэффициент мощности (0,5-0,6);
- высокое значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, превышающий 20%; отклонение напряжения на вводе буровой установки минус 15-20%, что существенно превышает значения, регламентируемые ГОСТ 32144-2013 [3,21].

Из-за низкого качества электроэнергии, если не принимать специальных мер, нормальная эксплуатация буровых установок невозможна [17].

Одним из универсальных способов снижения токов и напряжений высших гармоник в системах электроснабжения являются фильтро-компенсирующие устройства. Эти устройства представляют собой последовательное соединение индуктивного и емкостного сопротивлений, настроенных в резонанс или близко к нему на частоту генерируемой гармоники тока. Сопротивление ФКУ на резонансной частоте очень мало по сравнению с входным сопротивлением СЭС (в идеальном случае близко к нулю) и, таким образом, шунтирует ток высшей гармоники, генерируемой нелинейной нагрузкой [10].

Принципиальная схема включения ФКУ в однофазном исполнении приведена на рисунке 13. Из схемы видно, что при  $X_{L(n)} = X_{C(n)}$  суммарное сопротивление ФКУ  $X_{\Sigma} = X_{L(n)} - X_{C(n)} = 0$ , если  $n = n_{рез}$ . При  $n < n_{рез}$   $X_{\Sigma}$  приобретает емкостной характер. Поэтому на основной частоте 50 Гц ФКУ генерирует реактивную мощность.

При выборе параметров ФКУ настройка его реактора и конденсаторной батареи на частоту компенсируемой гармоники рассматривается как необходимое условие, которое может быть выполнено при любой емкости

конденсаторов. Однако, учитывая, что ФКУ генерирует на основной частоте реактивную мощность, следует учесть этот параметрический эффект, оценив баланс реактивной мощности в точке установки ФКУ.

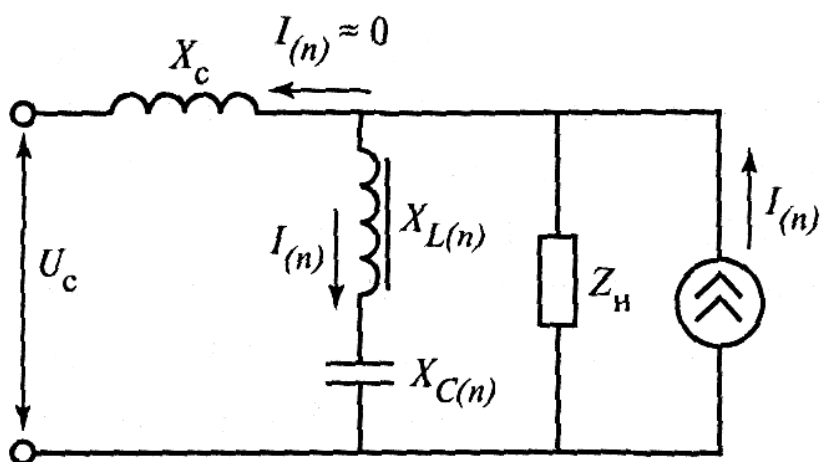


Рисунок 13 - Принципиальная схема включения ФКУ

Возможны два варианта выбора конденсаторной батареи ФКУ:

- при известном токе  $I_{(n)}$  компенсируемой гармоники и напряжении сети  $U_{(1)} \approx U_{ном}$  определить емкость КБ и ее установленную мощность, при которой мощность, генерируемая ФКУ, в сеть равна заданной  $Q_{(1)}$ ;

- при тех же исходных условиях определить установленную мощность КБ, при которой мощность, генерируемая ФКУ в сеть, минимальна  $Q_{(1) min}$ .

Обычно на шинах потребителя, располагающего нелинейными электроприемниками, устанавливается несколько фильтров, каждый из которых настроен на свою резонансную частоту, например 5, 7, 11 и 13-й гармоник. Так как ФКУ является источником реактивной мощности, в некоторых случаях возникает необходимость регулирования ФКУ в целях поддержания требуемого баланса реактивной мощности по условиям регулирования напряжения. Поэтому при переключениях фильтров следует иметь в виду, что их сопротивление на различных гармониках, порядок которых больше или меньше резонансной частоты фильтра, изменяется, принимая индуктивный или емкостной характер [13].

На частотах ниже резонансной частоты настройки фильтра последний имеет емкостной характер, а при частотах выше резонансной — индуктивный. В этой связи фильтр высокого порядка для более низких гармоник, для которых фильтры или не предусмотрены, или отключены, создает условия для возникновения резонансных явлений (тока или напряжения) с индуктивными элементами системы электроснабжения. Это, естественно, приводит к увеличению коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей, т.е. к ухудшению КЭ. И, наоборот, фильтр низкого порядка для более высоких гармоник имеет индуктивный характер и не может создавать условий для возникновения резонанса на этих гармониках. Такой фильтр шунтирует более высокие гармоники тока и, следовательно, способствует улучшению КЭ.

Из сказанного следует, что при управлении фильтрами, каждый из которых настроен на свою частоту, их следует подключать к сети, начиная с низшего порядка, а отключать в обратном порядке. Учитывая частотные характеристики ФКУ, обеспечивающие сравнительно низкие сопротивления на частотах смежных с частотой настройки фильтра, в ряде случаев ограничиваются установкой только низкочастотных фильтров. Например, установка фильтров 5-й и 7-й гармоник может оказаться вполне достаточной и эффективной для компенсации, кроме 5-й и 7-й, также 11-й и 13-й гармоник. Такой вариант всегда следует рассматривать при технико-экономической оценке выбранного решения.

Фильтрокомпенсирующие устройства применяются в сетях напряжением 0,4; 6; 10; 35 кВ, к которым, как правило, присоединяются потребители с нелинейной нагрузкой, а также в сетях более высокого напряжения для компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник тока, генерируемых преобразователями электропередачи и вставками постоянного тока статическими тиристорными компенсаторами [14,15]. Схемы соединения ФКУ в однофазном исполнении приведены на рисунке 14.

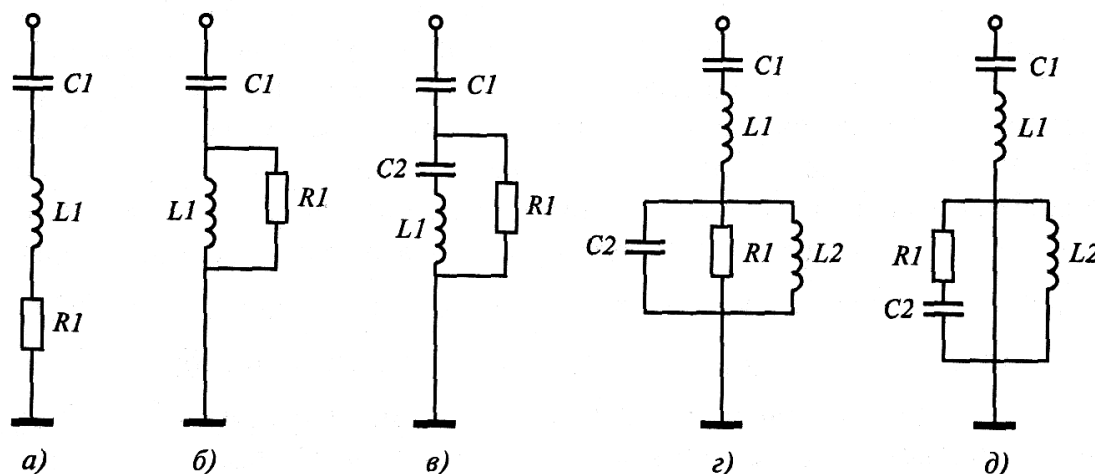


Рисунок 14 - Принципиальная схема силовых резонансных ФКУ высших гармоник:

- a, б* – одночастотные демпфируемые фильтры; *в* – одночастотный фильтр типа С ( $L1, C2$ -контур настроен на частоту сети);  
*з, д* – двухчастотный фильтр

Решением проблемы повышения качества электроэнергии на буровых установках является применение фильтро-компенсирующего устройства (ФКУ).

Фильтро-компенсирующее устройство решает две основные задачи:

1. Компенсация реактивной мощности. Это позволяет уменьшить отклонение напряжения в точке присоединения преобразователя к питающей электрической сети и уменьшить потери электрической энергии в системе электроснабжения.

2. Фильтрация высших гармоник напряжения сети, что позволяет приблизить форму напряжения к синусоидальной.

Для оптимизации электроснабжения буровой установки БУ3900 рассмотрим ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности (кратко ФКУ ступенчатого типа, ФКУ-С) и ФКУ с непрерывным «косвенным» регулированием реактивной мощности (кратко ФКУ-К), схемы которых приведены на рисунке 15:

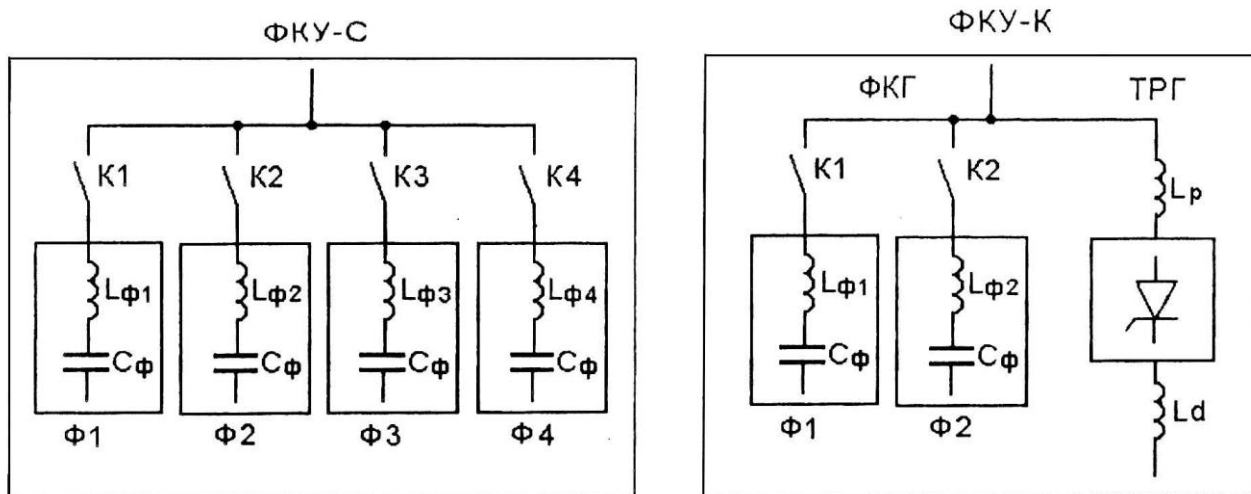


Рисунок 15 – Принципиальные схемы ФКУ-С (а) и ФКУ-К (б)

В ФКУ-С с помощью механических или тиристорных выключателей к сети подключаются или от неё отключаются отдельные ступени ФКУ и тем самым осуществляется дискретное регулирование реактивной мощности. Все ступени ФКУ-С являются резонансными LC-фильтрами, настроенными, например, на 5-ю, 7-ю, 11-ю и 13-ю гармоники.

В состав ФКУ-К входит фильтро-конденсаторная группа (ФКГ) и тиристорно-реакторная регулирующая группа (ТРГ). Непрерывное регулирование реактивной мощности ФКУ-К осуществляется путём управления тиристорным преобразователем ТРГ.

Для регулирования реактивной мощности некоторые специалисты считают перспективным также применение активных силовых фильтров, которые представляют собой полупроводниковые источники реактивной мощности с искусственной коммутацией тока (рисунок 16). Однако они не нашли применения в схемах электроснабжения буровых установок из-за сложной схемы и высокой стоимости.

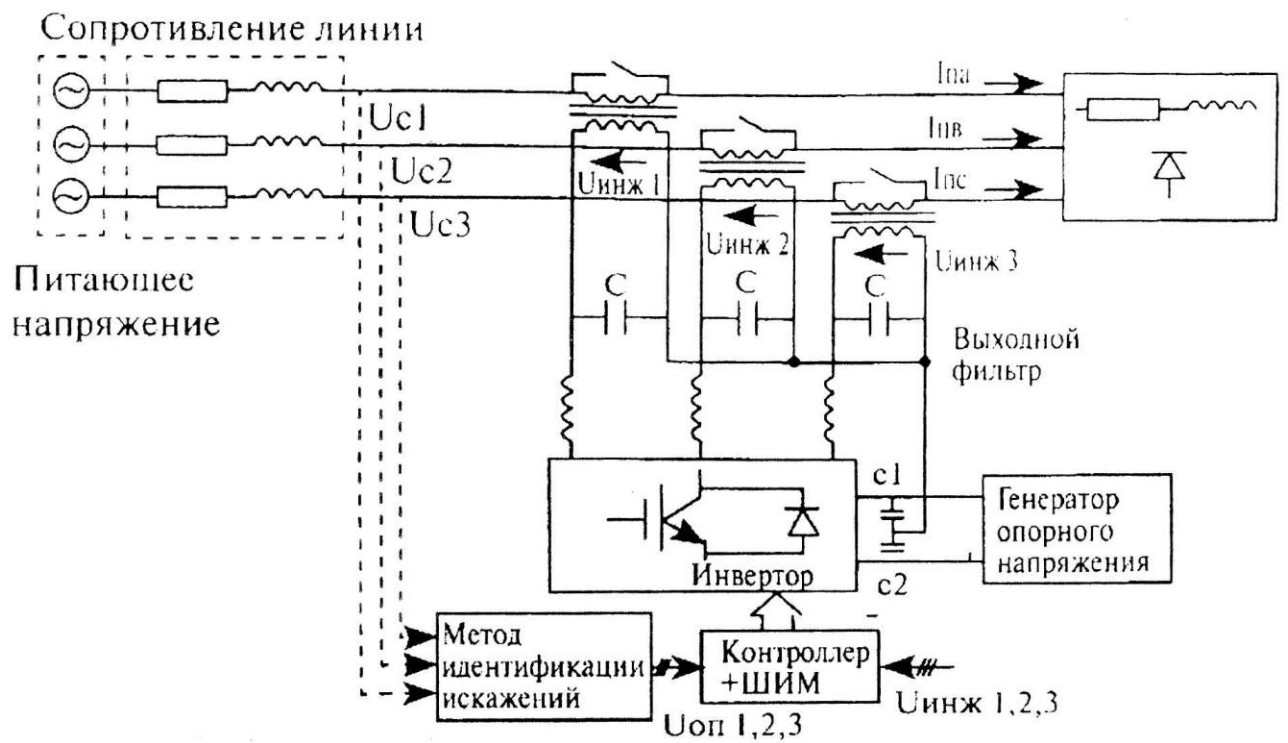


Рисунок 16 - Последовательный активный фильтр

## 2.2 Методика выбора ФКУ для буровых установок

Предлагается следующая методика выбора ФКУ для систем электроснабжения БУ с регулируемым электроприводом:

1. Анализ схемы электроснабжения БУ. Расчет показателей качества электрической энергии и проверка их на соответствие требованиям ГОСТ 32144-2013 [4].

2. Расчет электромеханических параметров электроприводов для типовых режимов работы БУ.

3. Предварительный выбор реактивной мощности ФКУ (выбор типа и мощности ФКУ, число ступеней ФКУ).

4. Составление схемы замещения для высших гармонических напряжения, генерируемых электроприводами БУ. Расчет значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения, суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения

5. По рассчитанным значениям коэффициентов гармонических составляющих напряжения определяются индуктивности фильтров ФКУ. Выбирается реактор с индуктивностью, близкой к расчетному значению.

6. Расчет показателей качества электроэнергии схемы электроснабжения БУ с установленным ФКУ, проверка их на соответствие требованиям ГОСТ 32144-2013 [3] и технического задания.

7. Проверка правильности выбора элементов ступенчатого ФКУ по току и напряжению.

8. Разработка технической документации, необходимой для изготовления ФКУ, его наладки и эксплуатации.



### **2.3 Вариант 1 - ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности в системе электроснабжения буровой установки**

На рисунке 17 представлена расчётная схема замещения электроснабжения БУ3900 с подключением низковольтного ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности. Полупроводниковый преобразователь представлен в схеме замещения источником высших гармонических тока. Приведенная схема замещения представляет из себя резонансный контур, состоящий из параллельных ветвей линии электропередачи и ФКУ, что может привести к резонансу тока на высших гармониках.

На основании схемы замещения составлена математическая модель для исследования установившихся режимов работы БУ3900 с ФКУ-С. Расчеты выполнены для режима турбинного бурения двумя насосами, который является наиболее тяжёлым по активной мощности согласно методике [18]. Результаты расчета отклонений напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на вводе БУ на вводе установки в зависимости от длины питающей линии 6 кВ приведены на рисунке 18. По согласованию с энергетическими службами эксплуатирующих организаций (заказчиков) принято, что на вводе БУ допускается отклонение напряжения от номинального в пределах  $\delta U = (+5\%) - (-15\%)$ .

Выводы по результатам расчета:

1. Установка ФКУ-С позволяет увеличить длину питающей линии 6 кВ от 8,5 км до 12,5 км, что очень важно, так как в настоящее время для буровых установок допустимой считается длина высоковольтной линии не более 6-8 км.

2. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения с увеличением длины линии возрастает. Однако включение ФКУ-С приводит к значительному снижению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

Таким образом, применение относительно дешёвого и простого ФКУ-С в

составе системы электроснабжения БУ обеспечивает требуемые показатели качества электроэнергии при длине высоковольтной линии, превышающей общепринятые в настоящее время нормы в 1,5 - 2 раза.

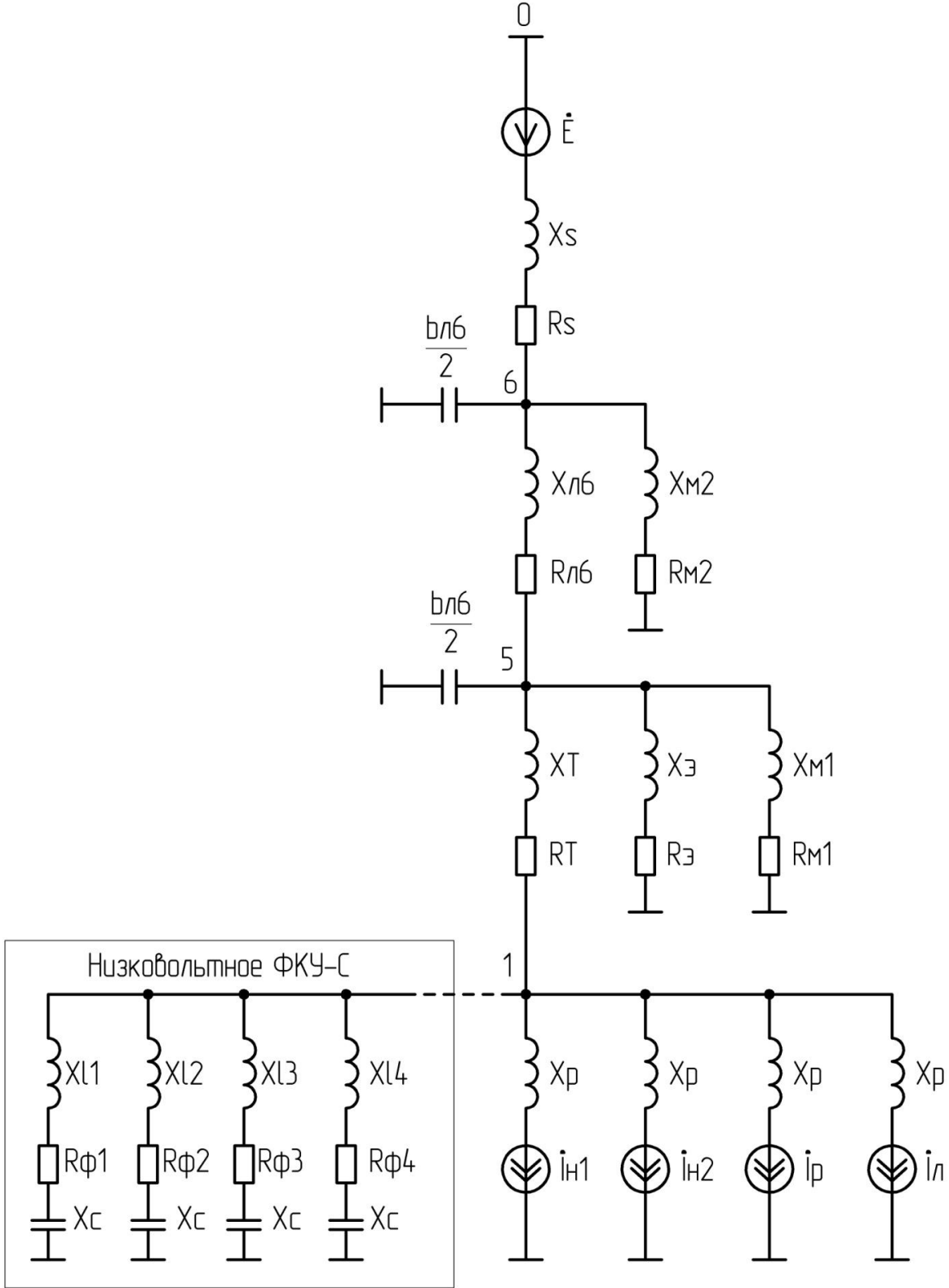
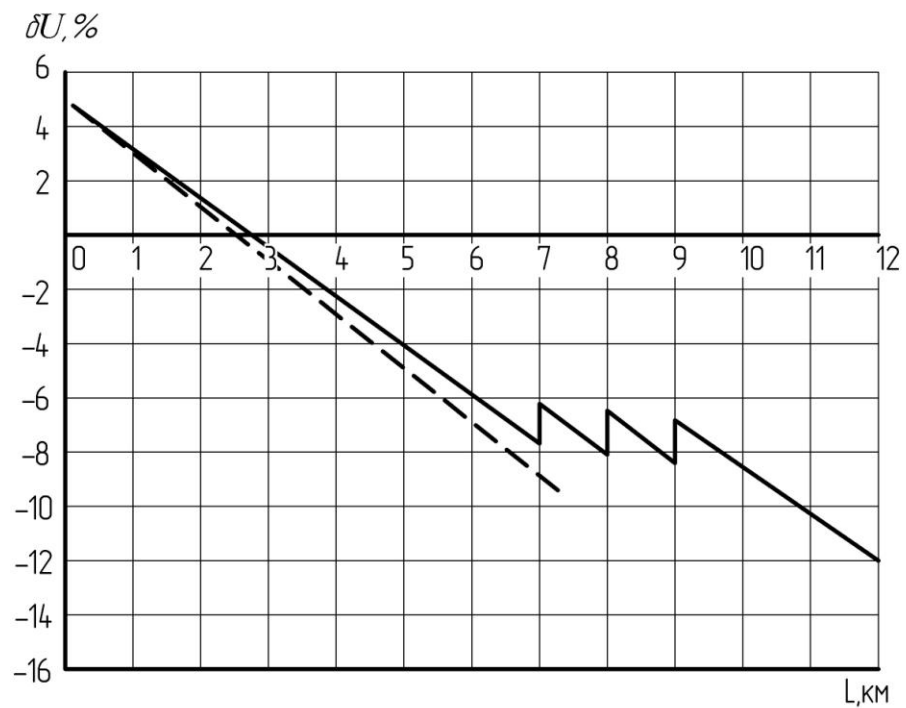
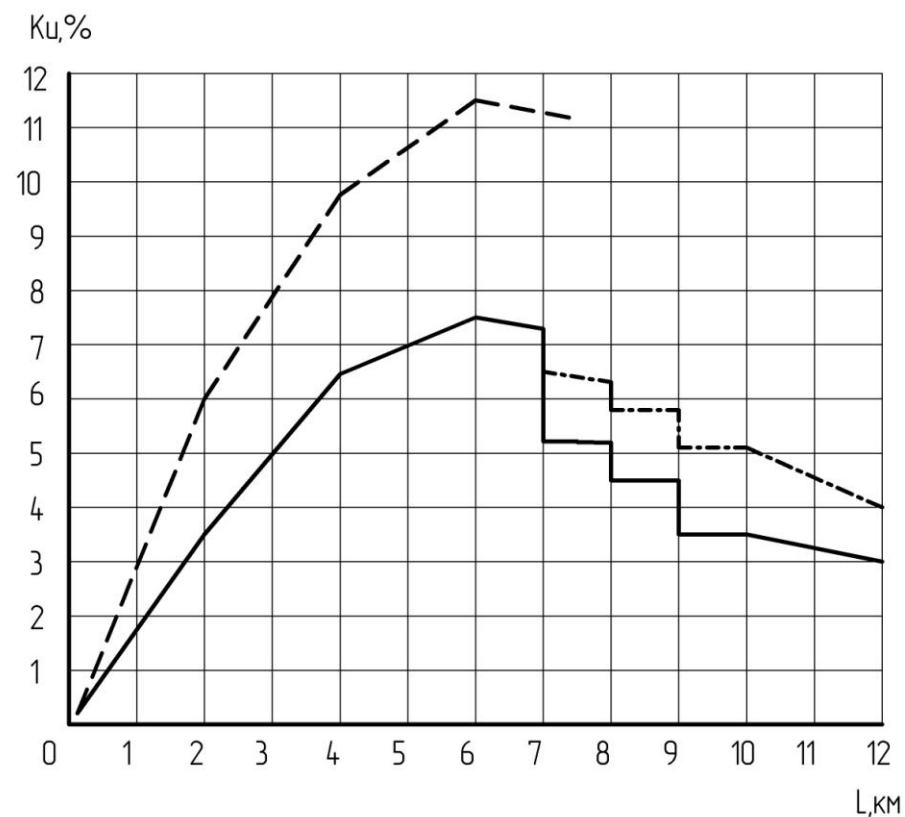


Рисунок 17 - Схема замещения электроснабжения буровой установки БУ3900 с ФКУ-С



- - - - - без ФКУ  
 ————— ФКУ, настроенное на 5 и 7 гармоники



- - - - - без ФКУ  
 ————— ФКУ, настроенное на 5 и 7 гармоники  
 - · - · - · ФКУ, настроенное на 5 гармонику

Рисунок 18 - Графики изменения параметров в зависимости от длины линии для установки БУ3900 с ФКУ-С:  
 а) отклонение напряжения на вводе установки; б) суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на вводе БУ

## **2.4 Вариант 2 - ФКУ с косвенной компенсацией реактивной мощности**

На рисунке 19 представлена схема замещения буровой установки БУ3900 с подключением ФКУ-К. В состав ФКУ-К входит два высоковольтных фильтра 5-й гармоники, подключенных к шинам 6 кВ, и тиристорная регулирующая группа ТРГ, подключенная к общим шинам на номинальное напряжение 660 В.

На основании схемы замещения составлена математическая модель для исследования установившихся режимов работы БУ3900 с ФКУ-К. Расчеты выполнены для режима турбинного бурения двумя насосами, который является наиболее тяжёлым по активной мощности, согласно методике, приведенной в [18].

Результаты расчета отклонений напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на вводе БУ на вводе установки в зависимости от длины питающей линии 6 кВ приведены на рисунке 20. По согласованию с энергетическими службами эксплуатирующих организаций (заказчиков) принято, что на вводе БУ допускается отклонение напряжения от номинального в пределах  $\delta U = (+5\%) - (-15\%)$ .

Выводы по результатам расчета:

1. Установка ФКУ-К позволяет увеличить длину питающей линии 6 кВ от 7,5 км до 10 км, что очень важно, так как в настоящее время для буровых установок допустимой считается длина высоковольтной линии не более 6-8 км.

2. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения с увеличением длины линии возрастает. Однако включение ФКУ-К приводит к значительному снижению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения находится в пределах значений, допустимых ГОСТ 32144-2013 [3].

Таким образом, установка ФКУ-К позволила обеспечить требуемые показатели качества электроэнергии и увеличить длину питающей

высоковольтной линии 6 кВ с 7,5 км до 10 км.

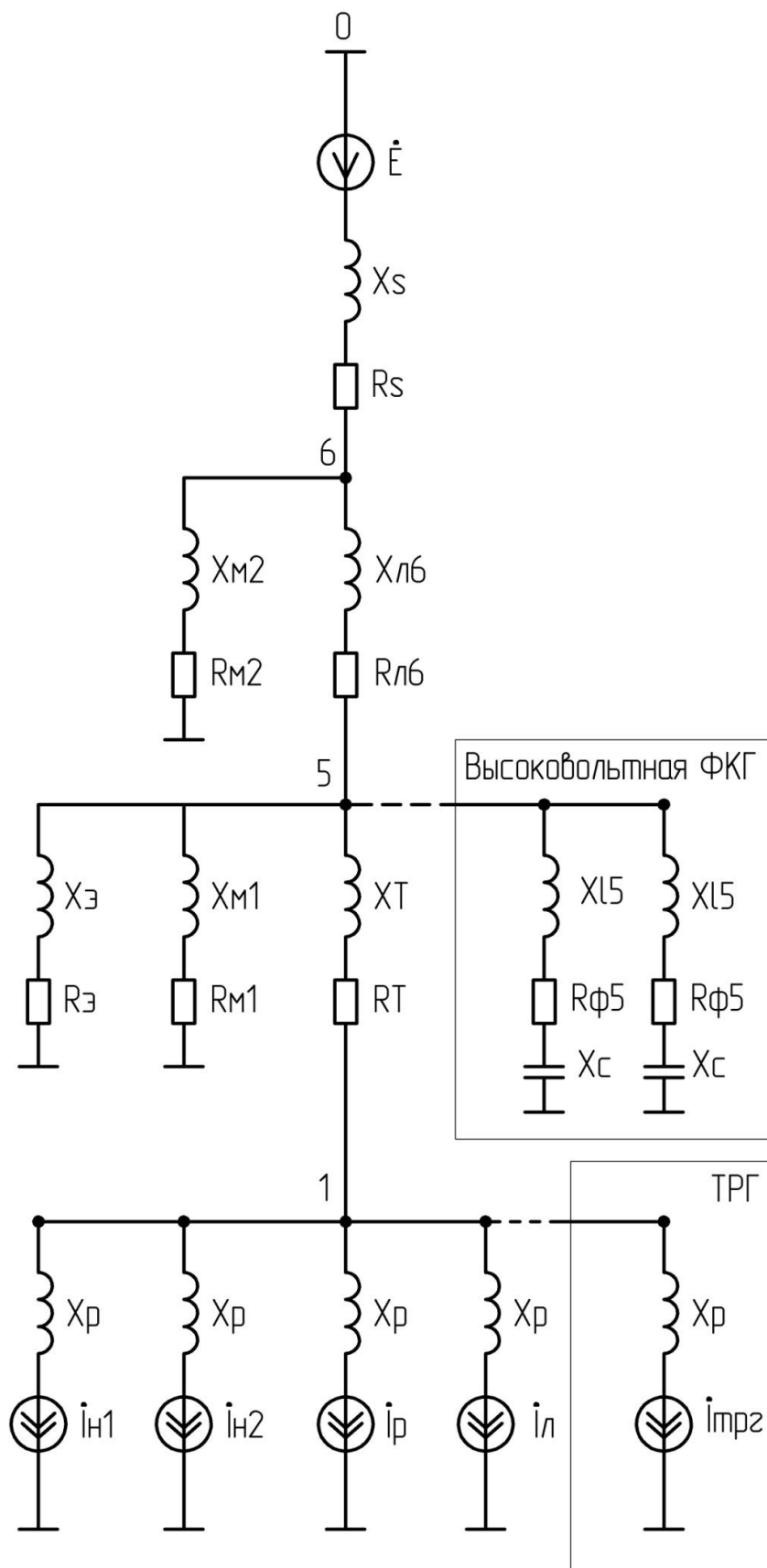


Рисунок 19 - Схема замещения электроснабжения буровой установки БУ3900 с ФКУ-К

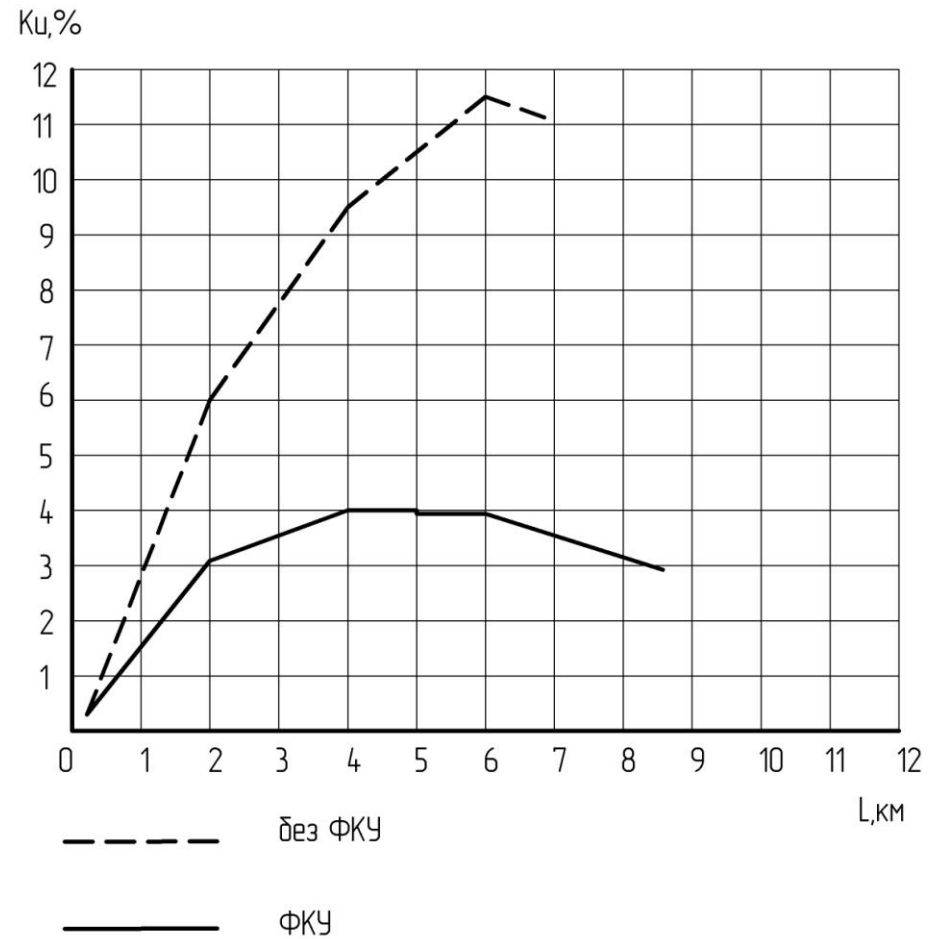
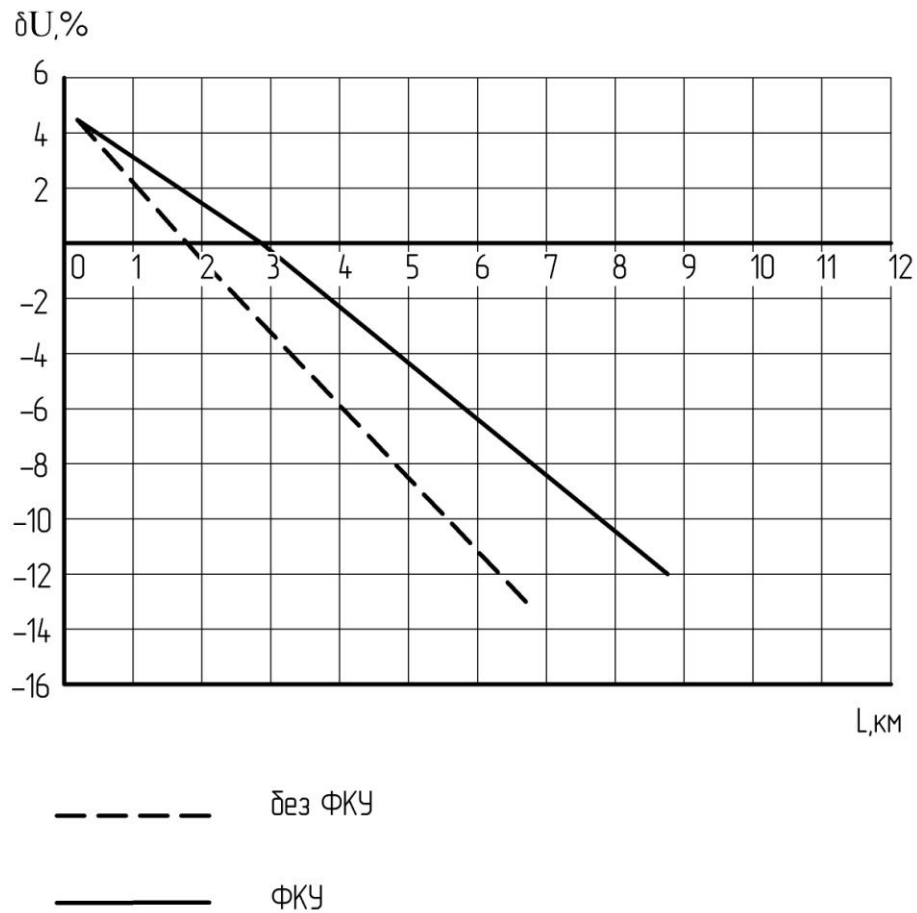


Рисунок 20 - Графики изменения параметров в зависимости от длины линии для установки БУ3900 с ФКУ-К:

а) отклонение напряжения на вводе установки; б) суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на вводе установки

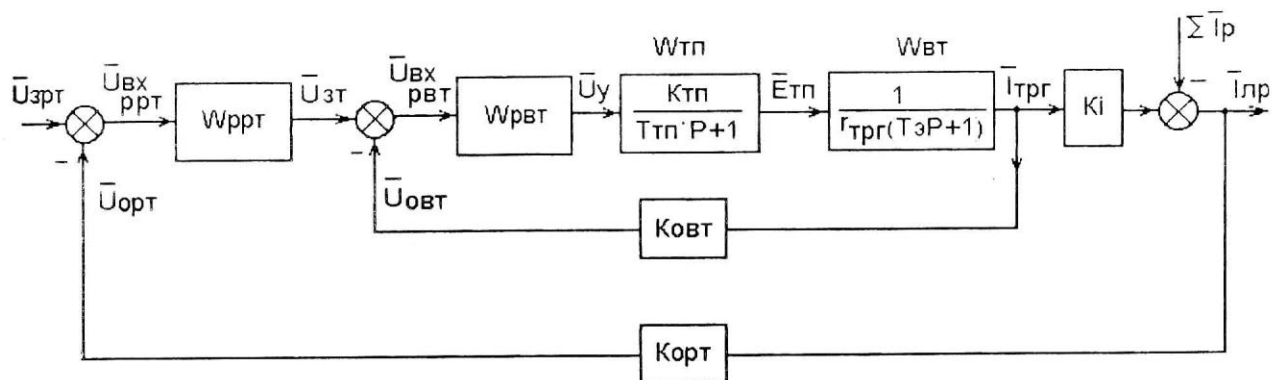
## **2.5 Принцип построения структур систем автоматического регулирования ФКУ с косвенной компенсацией реактивной мощности**

Автоматическое регулирование ФКУ-К может выполняться по реактивному току, реактивной мощности и напряжению.

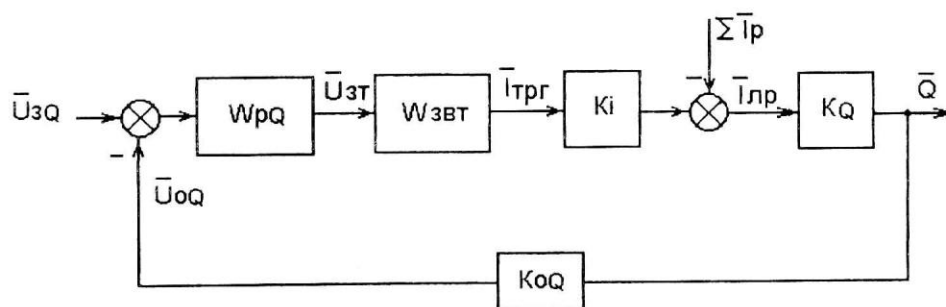
На рисунке 21 приведены структурные схемы системы автоматического регулирования ТРГ для этих трёх случаев. Все структурные схемы выполнены по принципу подчинённого регулирования координат. Внутренним контуром во всех случаях является замкнутый контур регулирования выпрямленного тока преобразователя ТРГ [13,17,21].

После выбора структур и передаточных функций регуляторов было проведено исследование электромеханических переходных процессов в системе соизмеримой мощности, содержащей ФКУ-К, так как ошибочный выбор структур систем автоматического регулирования ТРГ и передаточных функций регуляторов может привести к неустойчивой работе всей системы.

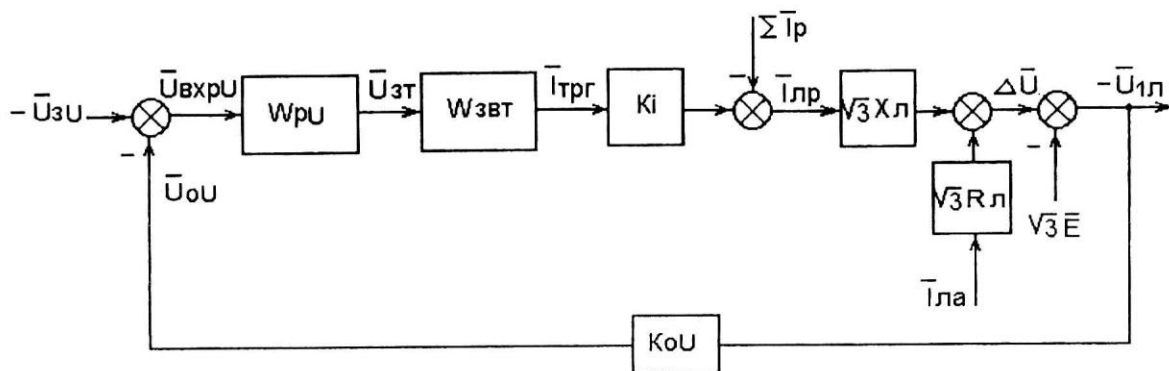
Исследование было выполнено для случая повторно-кратковременного режима работы электропривода буровой лебёдки, когда имеет место максимальное влияние электропривода на сеть в переходных режимах (рисунок 22). На основании выполненных исследований получено, что применение плавно регулируемого ФКУ с системой подчинённого регулирования координат позволяет обеспечить регулирование реактивной мощности и напряжения на вводе БУ с достаточно высоким быстродействием без значительных колебаний. Регулирование ФКУ-К по реактивному току позволяет получить переходные процессы аналогичные при регулировании ФКУ-К по реактивной мощности.



а



б



в

Рисунок 21 - Структурные схемы системы автоматического регулирования  
ФКУ-К

а) обратной связью по реактивному току; б) обратной связью по реактивной  
мощности; в) обратной связью по напряжению



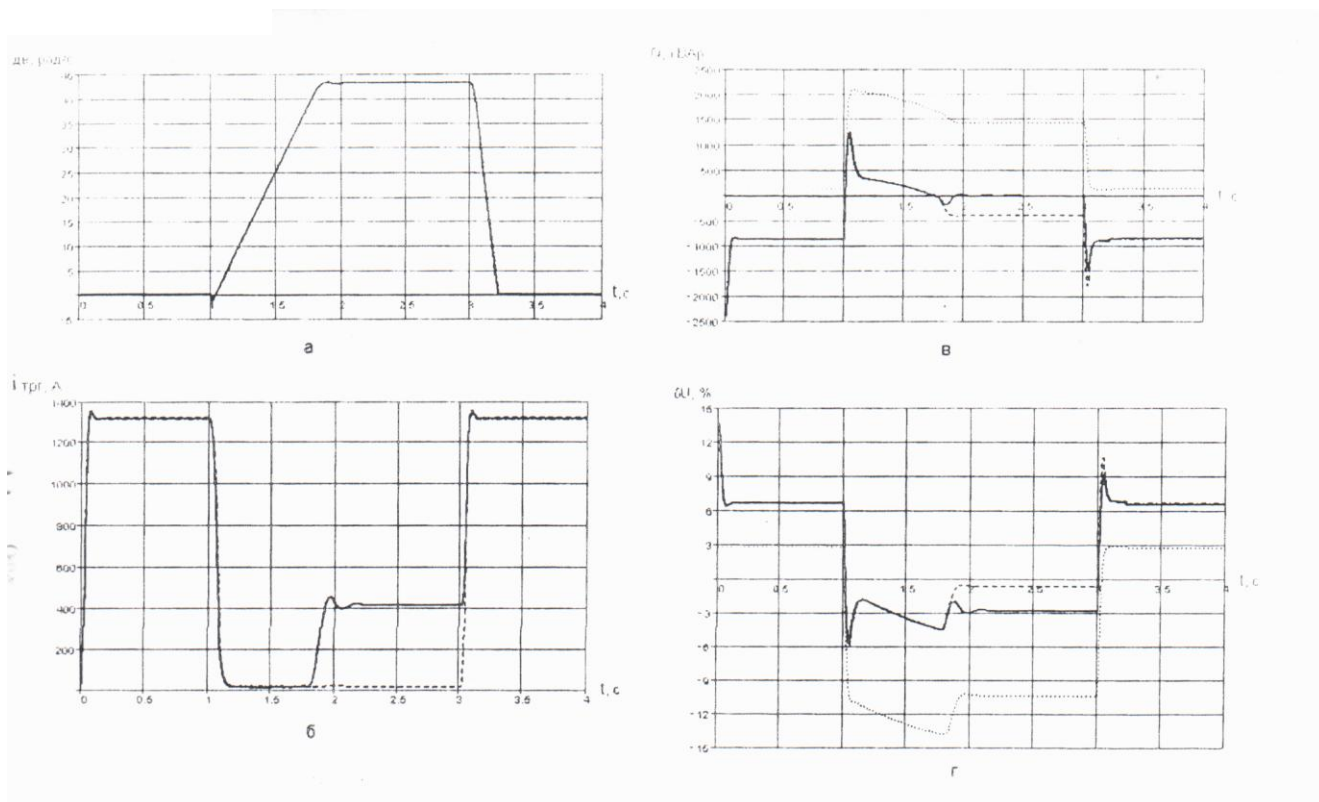


Рисунок 22 - Переходные процессы для случая повторно-кратковременного режима работы электропривода буровой лебёдки

(..... – без ФКУ; \_\_\_\_\_ - регулирование по реактивному току; \_ \_ \_ - регулирование по напряжению)

а) скорость электродвигателя; б) ток ТРГ; в) реактивная мощность системы; г) отклонение напряжения на вводе буровой установки

При больших длинах линии с целью поддержания допустимого отклонения напряжения на вводе БУ необходимо регулирование ФКУ-К по напряжению. Регулирование ФКУ-К по реактивной мощности не позволяет получить при увеличении длины линии допустимое отклонение напряжения.

ФКУ-К введено в эксплуатацию на шести установках БУ3900. Длина линии 6 кВ составляла до 11 км. В процессе наладки схема ФКУ была значительно усовершенствована с участием энергетиков ПАО «Сургутнефтегаз».

Одно из усовершенствований заключается в автоматическом отключении

одной ступени ФКГ в режиме паузы, когда электроприводы основных технологических механизмов не работают. Автоматическое отключение одной ступени ФКГ снизило увеличение напряжения на вводе БУ в режиме паузы до нормально допустимого значения 5%.

В настоящее время ПАО «Электропривод» эксплуатирует более 200 ФКУ-С и 6 ФКУ-К.

Промышленная эксплуатация полностью подтверждает положительные качества ФКУ. Вместе с тем следует отметить, что это достигнуто с большим трудом, и длина линии 11-12 км уже близка к предельно достижимой для буровых установок БУ3900.

### **3 Безопасность и экологичность проекта**

Раздел «Безопасность и экологичность проекта» выполнен на примере БУ3900, эксплуатируемой в Губкинском филиале ООО «РН – Бурение».

#### **3.1 Меры безопасности при эксплуатации буровых установок**

Буровая установка в отношении поражения электрическим током относится к категории особо опасных установок, поэтому наладка и обслуживание электрооборудования должны производиться наладочным и эксплуатационным персоналом, имеющим достаточно высокую квалификацию и хорошо знающим правила безопасности.

Для обеспечения надежной работы электрооборудования и безопасности персонала, как при наладке, так и при эксплуатации, необходимо выполнять требования «ПУЭ» и «Межотраслевых правил по охране труда (правил безопасности) при эксплуатации электроустановок» [1,2], а также требования «Правил безопасности в нефтяной и газовой промышленности».

При описании методов наладки, с целью более краткого их изложения, не даются общие указания о соблюдении безопасности. Имеется в виду, что персонал должен знать правила в необходимом объеме. Ниже отмечены лишь самые важные мероприятия организационного характера [16].

Кроме того, в настоящем руководстве при необходимости приводятся особые указания по отдельным наладочным операциям в части обеспечения безопасности.

На период проведения наладочных работ Управление буровых работ (УБР) выделяет ответственного представителя, который отвечает за обеспечение технических и организационных мероприятий для безопасного ведения работ.

Руководитель наладочных работ перед их началом на объекте обязан:

1. проверить выполнение ответственным представителем УБР технических и организационных мероприятий, обеспечивающих безопасное ведение наладочных работ; проверить наличие и состояние защитных средств;
2. проверить квалификационные удостоверения наладчиков;
3. ознакомить наладчиков с правилами работ и обеспечить инструктаж со стороны ответственного представителя УБР;
4. провести инструктаж на рабочих местах всего персонала, участвующего в наладке.

Наладочные работы должны производиться не менее чем двумя лицами с квалификационной группой не ниже III.

Для безопасного проведения работ наладочная бригада должна быть обеспечена набором аппаратуры, позволяющей создавать искусственные режимы, собрать измерительные схемы и т.д. без нарушения техники безопасности. Переносные приборы должны быть приспособлены для безопасной работы.

Для размещения переносных приборов следует использовать только деревянные столы. Металлический пол тиристорного модуля должен быть застелен резиновыми ковриками.

Операции по включению и отключению высоковольтных КРУ должны производиться ответственным электриком буровой бригады по устной заявке руководителя наладочных работ или выделенного им лица. Экстренное отключение в период наладки может производиться работниками наладочной бригады.

Перед опробованием электропривода механизма должно быть дополнительно проверено действие всех защит и блокировок, воздействующих на отключение электропривода. Пробный пуск, а также повторные пуски в случае изменения условий работы, должны производиться в присутствии представителей монтажной и эксплуатирующей организации.

Во всем неоговоренном работы по наладке должны проводиться в полном соответствии с требованиями «Правил технической эксплуатации

электроустановок потребителей» и «Межотраслевых правил по охране труда (правил безопасности) при эксплуатации электроустановок».

Оперативное обслуживание электрооборудования в процессе эксплуатации выполняют дежурные электрики, входящие в состав буровой бригады, которые обязаны регулярно производить обход, внешний осмотр работающего электрооборудования, контроль его электрических параметров по штатным приборам.

Техническое обслуживание и ремонт электрооборудования выполняет дежурный и ремонтный персонал в сроки, определяемые графиком технического обслуживания, который должен разрабатываться в соответствии с ПТЭ и с учетом условий эксплуатации.

Дежурный персонал должен иметь квалификационную группу не ниже III по технике безопасности. К выполнению работ по ремонту и техническому обслуживанию допускается группа лиц, которую возглавляет лицо с квалификацией не ниже III группы.

### **3.2 Охрана труда и пожарная безопасность**

За 2015 год проведена работа, направленная на улучшение противопожарного состояния объектов Губкинского филиала ООО «РН – Бурение», выполнение мероприятий указанных в предписаниях Государственного пожарного надзора, а именно:

1. Заключен договор на поставку пожарного инвентаря и оборудования.
2. Заключен договор на техническое обслуживание и текущий ремонт огнетушителей.
3. Пролонгирован договор на техническое обслуживание установок автоматической охранно-пожарной сигнализации установленных на объектах филиала.

4. Разработана инструкция о мерах пожарной безопасности для объектов ЦПВС.

5. Изготовлены и установлены в административном здании филиала планы эвакуации на случай пожара.

6. Двери лестничных клеток в административном здании БПО оборудованы приспособлениями для самозакрывания.

7. Приобретены и осуществлена поставка пожарного инвентаря и оборудования – на сумму 341503 рубля:

- Рукава пожарные д-66 мм в сборе с ГР-70 – 21 шт.;
- Ведра конусные пожарные – 25 шт.;
- Шкафы пожарные ШПК-315 НОК – 10 шт.;
- Лопаты совковые – 35 шт.;
- Огнетушители ОП-50 – 6 шт.;
- Лопаты штыковые – 32 шт.;
- Огнетушители ОП-8 – 86 шт.;
- Знаки пожарной безопасности – 52 шт.
- Огнетушители ОП-2 – 30 шт.;

8. Проведено техническое обслуживание огнетушителей, с заменой огнетушащего вещества – на сумму 319 426 рублей:

- огнетушитель ОУ-2 – 2 шт.;
- огнетушитель ОП-5 – 72 шт.;
- огнетушитель ОУ-10 – 1 шт.;
- огнетушитель ОП-8 – 1 шт.;
- огнетушитель ОП-3 – 1 шт.;
- огнетушитель ОП-10 – 190 шт.;
- огнетушитель ОП-4 – 1 шт.;
- огнетушитель ОП-50 – 30 шт.

9. Прошли обучение, по программе пожарно-технического минимума 240 человек на сумму 312 240 рублей следующая категория работников:

газоэлектросварщики – 67 человек; операторы котельных установок – 34 человека; инженерно-технические работники – 139 человек.

10. В зданиях АРИ ПРЦЭиЭ; лаборатории КИП; цех РГЗД; Склады №1,2,3 на внутренний водопровод установлены новые пожарные шкафы – 10 шт.

11. Калитки эвакуационных выходов в здании РММ-3 тампонажного цеха выполнены согласно норм.

12. Проведены еженедельные проверки противопожарного состояния объектов предприятия и ведение огневых работ на постоянных местах.

13. Проводилось ежемесячное техническое обслуживание УАПС смонтированных на объектах – годовая сумма составила 598 028, 52 рублей.

14. Осуществлена проверка знаний о мерах пожарной безопасности у специалистов предприятия согласно графика.

15. Проведены инструктажи, консультации и оказана методическая помощь специалистам предприятия в составлении документации по пожарной безопасности.

16. Подготовлены приказы по направлениям пожарной безопасности.

### **3.3 Охрана окружающей среды**

Работа Губкинского филиала ООО «РН – Бурение» по строительству эксплуатационных и разведочных скважин осуществляется в соответствии с руководящими, нормативными документами, инструкциями и правилами по охране окружающей среды и с учетом специфических условий проведения работ.

Строительство скважин, расположенных на лицензионных участках ООО «РН – Пурнефтегаз» и ЗАО «Ванкорнефть» производится с использованием экологически малоопасных химреагентов и материалов, которые не превышают значений предельно-допустимых концентраций.

В течение 2015 года были заключены договора на прием и утилизацию

(захоронение) отходов производства и потребления с ОАО «Жилкомсервис» г. Губкинский (твердые бытовые и производственные отходы) прием и отправка на утилизацию отработанных люминесцентных ламп; ООО «Полюс – Норд» г. Ноябрьск (отходы автотранспорта – отработанные автошины, автофильтры, промасленная ветошь); ООО «Нефтегазсервис» на прием и утилизацию черного металлолома.

За 2015 год пробурено для водообеспечения буровых бригад 18 артезианских скважин. За тот же срок по окончании разбуривания кустовых площадок ликвидировано в соответствии с требованиями РД 08-347-00 и природоохранного законодательства 8 артскважин.

Разработан Проект нормативов образования отходов и лимитов на их размещение, который прошел согласование в соответствующих органах, получены лимиты на размещение отходов потребления и производства. Затраты на разработку проекта 400 000 рублей.

Был также разработан пакет документов для получения лицензии на осуществление деятельности по обращению с опасными отходами. Затраты на его разработку составили 150 000 рублей, затраты на прохождение Государственной экологической экспертизы 41 668,28 рубля.

Разработан и прошел Государственную экологическую экспертизу Проект предельно допустимых выбросов в атмосферу загрязняющих веществ. Затраты на его разработку и прохождение ГЭЭ составили 350 000 и 41 668,28 рубля соответственно.

Экологические платежи за 2015 год составили 27 682 501,32 рубля, в том числе сверхнормативные платежи 14 654 923,42 рубля.



#### 4 Экономическая эффективность проекта

Искажение кривой питающего напряжения оказывает вредное воздействие на качество и надежность работы электроприемников и системы электроснабжения буровой установки и приводит к дополнительным потерям напряжения и старению изоляции электрооборудования системы электроснабжения БУ.

Определим ущерб, обусловленный искажением кривой питающего напряжения при работе буровой установки БУ3900 без ФКУ и с установкой ФКУ. Согласно [13,15] суммарный ежегодный ущерб из-за протекания высших гармонических напряжения определяется выражением

$$Y = \sum_{i=1}^m \sum_{n=2}^{40} \frac{U^2}{n\sqrt{n}} (A_i T_i \Delta P_{M.H.i} + B_i K_i) + \sum_{n=2}^{40} n K_U^2 B_{KL} \cdot K_{KL},$$

где  $K_{U(n)}$  – значение коэффициента гармонической составляющей напряжения;  $m$  – количество электрооборудования в системе электроснабжения БУ;  $K_i, K_{KL}$  – капитальные затраты на электрооборудование и кабели;  $\Delta P_{M.H.i}$  – номинальные потери в электрооборудовании по паспортным данным;  $T_i$  – число часов работы электрооборудования в году;  $A_i, B_i$  – расчетные коэффициенты для каждого типа оборудования;  $B_{KL}$  – расчетный коэффициент для высоковольтного кабеля.

Величина ежегодного экономического ущерба (электромагнитную составляющую) с учетом ослабления гармоник напряжения при их прохождении через силовые элементы питающей системы электроснабжения определяются из выражения [15]

$$Y = \sum_{i=1}^m \sum_{n=2}^{40} \frac{K_U^2}{n\sqrt{n} \cdot \gamma_{Ku_i}} (A_i T_i \Delta P_{M.H.i} + B_i K_i) + \sum_{n=2}^{40} \frac{n K_U^2}{\gamma_{Ku_i}} B_{KL} \cdot K_{KL},$$

где  $\gamma_{Ku_i}$  – коэффициенты ослабления высших гармоник напряжения для рассматриваемых участков системы электроснабжения.

Результаты расчетов составляющей ежегодного экономического ущерба, обусловленной искажением синусоидальности кривой питающего напряжения

при работе буровой установки БУ3900, без установки ФКУ и при установке ФКУ-К с фильтрокомпенсирующей группой ФКГ 5 и 7 гармоник (подключены к общим шинам 6 кВ) и тиристорной регулирующей группой ТРГ (подключена к общим шинам на напряжение 660 В), приведены в таблицах 4 и 5. Расчеты показывают, что наибольший удельный вес имеют составляющие ущерба от дополнительных активных потерь и сокращения срока службы изоляции силовых трансформаторов и электродвигателей буровой установки БУ3900. Сокращение срока службы линии 6 кВ намного меньше. При установке в системе электроснабжения БУ3900 ФКУ-К ежегодный экономический ущерб, обусловленный искажением кривой напряжения при работе БУ3900, снизился на 207,18 тыс.руб. (с 430,08 тыс.руб. до 222,9 тыс.руб.).

В таблице 6 приведен расчет укрупненной сметы затрат на внедрение проекта. Ожидаемая прибыль от установки ФКУ-К в схеме электроснабжения БУ3900:

$$P_{p.ож.} = \Delta_{y.g.} = 430,08 - 222,9 = 207,18 \text{ тыс. руб.}$$

Налог на прибыль:

$$H_{приб.} = P_{p.ож.} \cdot K_{нал.},$$

$$H_{приб.} = 207,18 \cdot 0,20 = 49,72 \text{ тыс.руб.}$$

где  $K_{нал}$  – коэффициент налогообложения прибыли, действующий на данный год.

Чистая ожидаемая прибыль:

$$P_{p.чист} = P_{p.ож.} - H_{приб.},$$

$$P_{p.чист} = 207,18 - 49,72 = 157,46 \text{ тыс.руб.}$$

Расчетный срок окупаемости капитальных вложений (инвестиции) для осуществления проектируемого варианта:

$$T_{ок.расч.} = \frac{K_{вв.пр}}{P_{p.чист}};$$

$$T_{ок.расч.} = 2,27 \text{ года,}$$

где  $K_{вв.пр}$  – инвестиции необходимые для приобретения вновь вводимого дорогостоящего оборудования.

Таблица 4 - Расчет ежегодного экономического ущерба, обусловленного искажением кривой напряжения при работе БУ3900

№ п/п	Наименование оборудования	Тип	Количество	$U_H$ , кВ	$P_H (S_H)$ кВт (кВА)	Т, тыс. ч/год	$\Delta P_{M.H.}$ кВт	К, т.руб	$\gamma_{Ku}$	Ежегодный ущерб, тыс.руб
1	Линия 6 кВ	АС 3x150	10,2 км	6,0	-	-	-	347	1,02	21,7
2	Трансформатор	ТСЗП 1000	2	6/0,66	1000	8,0	16,5	2048	1,03	201,63
3	Электродвигатели БУ		6	0,8 – 0,44	90 - 1000	8,0	41-124	80,73 - 201,39	1,05	206,75
Итого по БУ3900										430,08

Таблица 5 - Расчет ежегодного экономического ущерба, обусловленного искажением кривой напряжения при работе установки БУ3900 при подключении ФКУ-К

№ п/п	Наименование оборудования	Тип	Количество	$U_H$ , кВ	$P_H (S_H)$ кВт (кВА)	Т, тыс. ч/год	$\Delta P_{M.H.}$ кВт	К, т.руб	$\gamma_{Ku}$	Ежегодный ущерб, тыс.руб
1	Линия 6 кВ	АС 3x150	10,2 км	6,0	-	-	-	347	0,51	10,85
2	Трансформатор	ТСЗП 1000	2	6/0,66	1000	8,0	16,5	2048	0,53	103,75
3	Электродвигатели БУ		6	0,8 – 0,44	90 - 1000	8,0	41-124	80,73 - 201,39	0,55	108,30
Итого по БУ3900										222,9

Таблица 6 - Укрупнённая смета затрат на установку ФКУ-К в схеме электроснабжения БУ3900

Статья затрат	Кол-во	Стоимость единицы, тыс.руб.	Суммарные затраты, тыс.руб.
Стоимость основного оборудования	1	305,0	275,0
Проектирование ФКУ-К			27,5
Монтаж и наладка ФКУ-К			55,2
Итого			357,7

Использование метода дисконтирования, для решения вопроса об целесообразности вложения средств в разработанный проект который в течение принятого горизонта расчета (3 года):

Процентные факторы:

$$\text{для первого года составит } \frac{1}{(1+0,1)^1} = 0,909;$$

$$\text{для второго года } - \frac{1}{(1+0,1)^2} = 0,826; \text{ для третьего года } - \frac{1}{(1+0,1)^3} = 0,753.$$

Тогда ожидаемая за три года общая чистая дисконтированная прибыль (текущая стоимость денежных расходов) составит:

$$D_{\text{общ.диск}} = P_{\text{р.чист.диск}}(T) = 157,46 \cdot (0,909 + 0,826 + 0,753) = 391,76 \text{ тыс.руб.}$$

Интегральный экономический эффект  $\mathcal{E}_{\text{инт.}}$  (чистый дисконтированный доход) в этом случае составит:

$$\text{ЧДД} = D_{\text{общ.диск}} - K_{\text{вв.пр.}} = 391,76 - 357,7 = 34,06 \text{ тыс.руб.}$$

Таким образом, доход предприятия от установки ФКУ-К за 3 года составит 34,06 тыс. руб. Общая стоимость доходов  $\mathcal{E}_{\text{инт.}}$  (ЧДД) больше текущей стоимости затрат  $K_{\text{вв.пр.}}$ , т.е проект эффективен.

Индивидуальный доход на каждую 1 тыс. руб. вложений:

$$\text{ИД} = \frac{\text{ЧДД}}{K_{\text{вв.пр.}}} = 34,06 / 357,7 = 0,095 \text{ тыс. руб.}$$

Индивидуальный доход составит 0,095 тыс.руб. на каждую 1 тыс.руб. вложений.

## **Заключение**

В выпускной квалификационной работе для оптимизации системы электроснабжения буровой установки БУ3900 предложено применение фильтро-компенсирующего устройства. Выполненные расчеты для БУ3900 показали, что оба типа фильтро-компенсирующие устройства: ступенчатое ФКУ и ФКУ косвенной компенсации обеспечивают работу установок при длине питающей линии 6 кВ до 11 – 12 км, что без применения ФКУ практически невозможно.

ФКУ с непрерывным «косвенным» регулированием являются более совершенными, но и более дорогими, требуется дополнительное устройство ТРГ, которое необходимо размещать в контейнере. Но они позволяют решить задачу плавного регулирования реактивной мощности при быстрых изменениях режимов работы электроприводов буровых установок.

ФКУ ступенчатого типа может применяться в случаях, когда существует недостаток в средствах и ограничения по габаритам электрооборудования буровых установок.

## Список использованных источников

1. Правила устройств электроустановок (ПУЭ). – С.-Пб.: Энергоатомиздат, 2003.
2. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. – М.: Издательство «Омега-Л», 2007.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы к качеству электрической энергии в сетях общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.
4. Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование/ Под общей редакцией А.М. Гусмана, К.П. Порожского. – Екатеринбург: УГГГА. - 2012.
5. Жеваго, К.А. Привод буровых установок/ Жеваго К.А., Портной Т.З., Школьников Б.М.. - М.: Недра. - 2010.
6. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат. – 2014.
7. Колчерин, В.Г. Новое поколение буровых установок Волгоградского завода в Западной Сибири/ В.Г. Колчерин, И.В. Колесников, В.С. Копылов, Ю.Л. Баренбойм. - ГУП ХМАО «Сургутская типография». - 2013.
8. Моцохейн, Б.И. Электропривод, электрооборудование и электроснабжение буровых установок/ Б.И. Моцохейн, Б.М. Парфенов, В.А. Шпилевой. – Тюмень. - 2012.
9. Портной, Т.З. Электрооборудование буровых установок Уралмашзавода/ Т.З. Портной, М.Г. Юньков, П.И. Юрченко. - М.: Энергия. - 2011.
10. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций/ Рожкова Л.Д., Карнеева Л.К., Чиркова Т.В. – М.: Изд. центр «Академия», 2014.
11. Электропривод постоянного тока. Состояние и тенденции: сборник докладов научно-технического семинара. - М.: Издательство МЭИ. – 2014.

12. Фираго, Б.И. Непосредственные преобразователи частоты в электроприводе. – Минск : Изд. «Университетское». – 1990.
13. Управление качеством электроэнергии/ И.И. Карташев, В.Н.Тульский, Р.Г.Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд. дом МЭИ. – 2013.
14. Справочник по проектированию электроэнергетических систем /Под редакцией С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. - М.: Энергоатомиздат, 2014.
15. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии/ Под общ. ред. В.Г.Герасимова и др. М.: МЭИ, 2002.
16. Эффективность электроэнергетических установок и систем. Техника безопасности в электроэнергетических установках: справочное пособие/ под ред. П. А. Долина. - М.: Энергоатомиздат, 2013.
17. Arrilaga, J. Power System Harmonics. Second edition. / J. Arrilaga, N. R. Watson. - Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2003.
18. EN 50160. Voltage Characteristics in Public Distribution Systems. – Eurelectric, 2010.
19. IEEE Std 519. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Elect Power Systems. – IEEE, 2013.
20. Jovcic, D. High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids / D. Jovcic, K. H. Ahmed. — Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
21. Matlab. The Language of Technical Computing [Электронный ресурс]. -Режим доступа: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>, свободный. - Загл. с экрана.
22. Lambert, M. Analytical Calculation of Leakage Inductance for Low-Frequency Transformer Modeling / M.Lambert, F. Sirois, M. Martinez-Duro, J. Mahseredjian. //IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, Jan. — Vol. 28. — N 1. — Pp. 507–515.