

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи



Казанцев Александр Андреевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДОБЫЧИ НЕФТИ  
РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ  
ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**Диссертация на соискание  
ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
Косорлуков И.А.

Самара 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ НЕФТИ .....	15
1.1 Особенности схем электроснабжения электротехнических комплексов предприятий нефтедобывающей промышленности .....	15
1.2 Анализ направлений повышения энергетической эффективности добычи нефти .....	19
1.3 Математическая модель погружных асинхронных электродвигателей и двигателей штанговых скважинных насосных установок, адаптированная к задачам определения влияния действующего значения напряжения на их работу .....	25
1.4 Методы расчета оптимального напряжения промышленной подстанции .....	27
1.5 Выводы по первой главе .....	33
2 ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОГРУЖНЫХ НАСОСОВ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ И ВЕЛИЧИНЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН .....	35
2.1 Напорные характеристики центробежных насосов и их влияние ..... на потребление мощности погружных асинхронных двигателей .....	35
2.2 Влияние особенностей преобразователей частоты на потребление ..... электрической энергии при добыче нефти и обоснование целесообразности их применения в станциях управления погружными центробежными насосами .....	39
2.3 Пример расчета целесообразности применения преобразователя частоты в станции управления погружным электроцентробежным насосом .....	50
2.4 Напорные характеристики штанговых скважинных насосных установок и их влияние на потребление мощности приводными двигателями .....	54
2.5 Влияние величины напряжения на статорных обмотках..... асинхронных двигателей на потребляемую активную и реактивную .....	61
мощность электротехническими комплексами добывающих скважин .....	61

2.6 Выводы по второй главе.....	65
<b>3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ .....</b>	<b>66</b>
3.1 Поиск оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию с тремя ПЭД.....	66
3.2 Расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции для отходящей линии с тремя ШСНУ.....	86
3.3 Расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с учетом особенностей преобразователей частоты станций управления погружными насосами.....	98
3.4 Универсальная методика и алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции.....	111
3.5 Выводы по третьей главе.....	128
<b>4 ДОСТИЖИМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ НЕФТИ .....</b>	<b>130</b>
<b>С УЧЕТОМ ДИСКРЕТНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ .....</b>	<b>130</b>
4.1 Влияние дискретности регулирования напряжения промышленной подстанции на потребляемую мощность электротехническими комплексами погружных насосов .....	130
4.2 Подготовка данных для расчета оптимального значения напряжения промышленной подстанции, питающей реальную отходящую линию .....	137
4.3 Расчет оптимального значения напряжения промышленной подстанции, питающей рассматриваемую отходящую линию, и оценка адекватности расчета .....	153
4.4 Выводы по четвертой главе .....	160
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>162</b>
Библиографический список.....	163
Приложение 1 .....	173
Приложение 2 .....	199

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы.

В соответствии с Федеральным Законом РФ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 г. повышение энергетической эффективности производственных процессов в нефтяной отрасли является актуальной задачей. Кроме того, в соответствии со Стратегией долгосрочного развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. от нефтегазодобывающих компаний требуют развития направления оптимизации потребления энергетических ресурсов при добыче и транспортировке углеводородного сырья.

Анализ затрат электроэнергии по производственным процессам нефтедобывающей компании показывает, что наиболее энергоемким является процесс добычи нефти (рисунок 1) [1, 2].

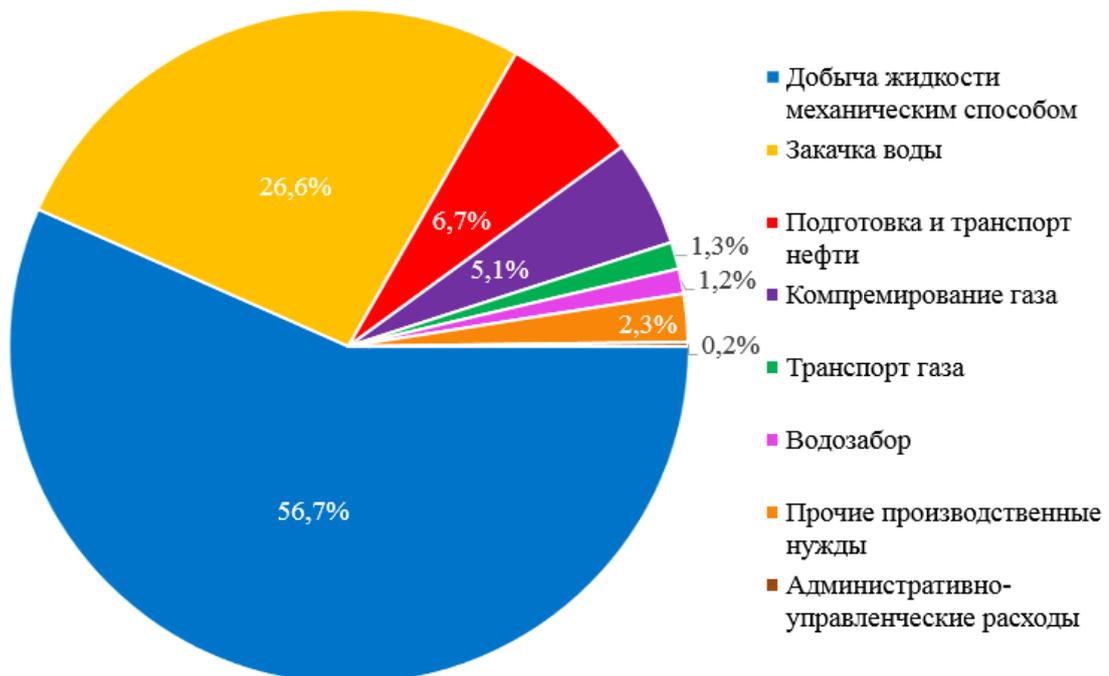


Рисунок 1 – Распределение затрат электроэнергии по производственным процессам нефтедобывающей компании

В связи с этим весьма актуальным является повышение энергетической эффективности электротехнического комплекса добычи нефти.

### **Степень разработанности проблемы.**

Основные направления, позволяющие повысить энергетическую эффективность электротехнического комплекса добычи нефти заключаются в следующем:

- применение насосов и электрооборудования с более высоким коэффициентом полезного действия (КПД);
- применение электродвигателей меньшей установленной мощности;
- применение преобразователей частоты;
- использование трансформаторов меньшей установленной мощности;
- энергоэффективный дизайн установок электроцентробежных насосов;
- применение конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности.

Однако исследования показывают, что на потребление электрической энергии при добыче нефти также существенное влияние оказывает уровень напряжения промышленной подстанции [4-6]. При этом следует отметить, что в зависимости от комплектации электротехнических комплексов добывающих скважин (ЭКДС) и отходящей от промышленной подстанции линии величина напряжения, обеспечивающая минимум потерь в элементах отходящей линии или удельного потребления электрической энергии на кубометр добываемой жидкости, может быть разной [4-6]. В связи с этим возникает задача определения оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, обеспечивающей тот или иной критерий оптимизации при добыче нефти.

Методам оптимизации режимов работ в электроэнергетике посвящено большое количество работ [7-11]. Прежде всего, следует отметить работы таких отечественных ученых, как Мельников Н.А., Голованов, А.П., Сушков В.В., Халилов Ф.Х., Строев В.А., Веников В.А., Хачатрян В.С., Бартоломей

П.И., Арзамасцев Д.А., Горнштейн В.М., Идельчик В.И., Герасименко А.А., Абрамович Б.Н., Ершов М.С., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Кудрин Б.И., Конюхова Е.А., Мищенко И.Т., Хакимьянов М.И. [12-45].

При этом вопросам определения оптимального напряжения промышленной подстанции посвящены работы Нурбосынова Д.Н., Табачниковой Т.В., Швецковой Л.В., Мукани Э.Б. [3, 46-49].

Однако данные исследования не учитывают влияния высших гармоник в выходном напряжении преобразователей частоты станций управления погружными насосами на дополнительные потери в элементах электротехнических комплексов добывающих скважин [50] и возможностей преобразователей частоты стабилизировать амплитуду напряжения [51]. Кроме того, мало изучено влияние напорной характеристики плунжерного насоса на величину скорости и потребляемую мощность асинхронного двигателя штанговой скважинной насосной установки при изменении напряжения питания.

Следует также учитывать, что для автоматического регулирования напряжения промышленной подстанции применяются трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН), причем это регулирование осуществляется дискретно. Поэтому актуальным является разработка методики прогнозирования потребляемой мощности ЭКДС отходящей от промышленной подстанции линии с учетом дискретности регулирования напряжения.

В связи с этим сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

**Цель диссертационной работы** – повышение энергетической эффективности электротехнического комплекса добычи нефти за счет квазиоптимального регулирования напряжения промышленной подстанции.

**Задачи диссертационного исследования.**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить зависимость средней скорости и потребляемой мощности асинхронного двигателя штанговой скважинной насосной установки при вариации напряжения статора.

2. Оценить влияние преобразователей частоты станций управления погружными насосами на потребляемую мощность электротехническими комплексами добывающих скважин.

3. Разработать методику и алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, учитывающие широкий спектр комплектации электротехнических комплексов добывающих скважин.

4. Определить влияние дискретности регулирования напряжения трансформаторами с РПН на прогнозируемую потребляемую мощность и потери в элементах отходящей линии и электротехнических комплексах добывающих скважин.

5. Провести апробацию разработанных технических решений сравнением результатов расчета с фактическими данными промышленной подстанции.

**Объектом исследования** являются электротехнические комплексы добывающих скважин нефтяного промысла.

**Предметом исследования** являются процессы обеспечения энергоэффективности электротехнического комплекса добычи нефти.

#### **Методы исследования.**

Исследования проведены с использованием методов теории электрических цепей, теории электрических машин, теории электропривода, численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, математического и компьютерного моделирования.

#### **Научная новизна.**

1. Определены аналитические зависимости для расчета скорости и потребляемой мощности асинхронными двигателями штанговой скважинной насосной установки и погружного центробежного насоса при вариации питающего напряжения, отличающиеся учетом напорных характеристик насо-

сов, кинематики исполнительного механизма и особенностей преобразователей частоты (п. 1 паспорта специальности).

2. Определены условия, при которых применение преобразователя частоты в станции управления погружным центробежным насосом приводит к снижению затрат электрической энергии, отличающиеся учетом напорной характеристики насоса и дополнительных потерь в повышающем трансформаторе и погружном электродвигателе от высших гармоник в выходном напряжении преобразователя частоты (п. 2 паспорта специальности).

3. Разработаны методика и алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, обеспечивающей минимум удельных затрат электроэнергии при добыче нефти, отличающиеся учетом особенностей напорных характеристик погружных насосов, преобразователей частоты станций управления и дискретности регулирования напряжения (п. 3 паспорта специальности).

#### **Практическая значимость результатов работы.**

1. Разработанная методика позволяет обосновано регулировать напряжение промышленной подстанции с целью снижения удельных затрат электрической энергии при добыче нефти.

2. Полученные аналитические зависимости позволяют определить целесообразность применения преобразователей частоты в станциях управления погружными центробежными насосами с позиции экономии электрической энергии.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректным использованием соответствующего математического аппарата, вычислительных программных комплексов и подтверждается удовлетворительным совпадением результатов расчетов и экспериментальных данных.

#### **Реализация результатов работы.**

Основные результаты работы были использованы АО «Самарская сетевая компания» (г. Самара) и ООО «Сетевик» (г. Самара) для повышения надежности и эффективности электроснабжения электротехнических комплек-

сов добывающих скважин, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара), что подтверждается соответствующими актами внедрения.

### **Апробация результатов работы.**

Отдельные результаты исследования докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы и инновационные решения в нефтегазовой отрасли» (г. Москва, 2021 г.), на Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения» (СамГТУ, г. Самара, 2023 г.), на IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика будущего – цифровая трансформация» (ЛГТУ, г. Липецк, 2023 г.), на Международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы UralCon-2023» (МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, 2023 г.), на научных семинарах кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 5 научных статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 5 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций.

### **Личный вклад автора в диссертационное исследование.**

В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат: разработка алгоритмов расчета оптимального напряжения промышленной подстанции и прогнозируемой потребляемой мощности с учетом дискретности регулирования напряжения; аналитические выражения для расчета скорости асинхронных двигателей штанговых скважинных насосных установок и погружных двигателей с учетом напорных характеристик насосов и особенностей преобразователей частоты станций управления; результаты расчетов и их анализ.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Аналитические зависимости для расчета скорости и потребляемой мощности асинхронными двигателями штанговой скважинной насосной установки и погружного центробежного насоса при вариации питающего напряжения.

2. Методика и алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, обеспечивающей минимум удельных затрат электроэнергии при добыче нефти, отличающиеся учетом особенностей напорных характеристик погружных насосов и преобразователей частоты станций управления.

3. Методика и алгоритм расчета прогнозируемого потребления энергии электротехническими комплексами добывающих скважин, отличающиеся учетом дискретности регулирования напряжения промышленной подстанции.

### **Структура и объём работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Основная часть работы изложена на 201 странице машинописного текста, иллюстрирована 38 рисунками и 20 таблицами. Библиографический список содержит 88 наименований на 10 страницах.

**Во введении** дано обоснование актуальности задачи регулирования напряжения промышленной подстанции, обеспечивающего снижение затрат электрической энергии при добыче нефти, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

**В первой главе** рассмотрены особенности схем электроснабжения электротехнических комплексов предприятий нефтедобывающей промышленности. Проанализированы направления повышения энергетической эффективности добычи нефти и оценен их вклад в решение этой задачи. Рассмотрена математическая модель погружного асинхронного двигателя и двигателя штанговой скважинной насосной установки (ШСНУ), которая адапти-

рована к задачам определения влияния изменения действующего значения напряжения на его скорость и потребления активной и реактивной мощности. Рассмотрен метод определения оптимального напряжения с целью обеспечения минимума потерь электрической энергии в распределительной электрической сети на основе анализа суточных графиков напряжений и токов промышленной подстанции.

**Во второй главе** рассмотрены напорные характеристики погружных центробежных насосов и аналитические зависимости для расчета момента и мощности на входном валу в зависимости от параметров рабочей точки насоса и особенностей добываемой жидкости. Проведено обоснование целесообразности применения преобразователей частоты в станциях управления погружными насосами с позиций экономии электрической энергии. Рассмотрено два режима работы скважины. В первом режиме требуемая подача насоса обеспечивается дросселированием штуцера, а во втором – регулированием скорости центробежного насоса с помощью преобразователя частоты. Приведены аналитические зависимости для расчета потребляемой станцией управления активной мощности, позволяющие определить, при каком дебите скважины потребление активной мощности будет равным для обоих случаев. Приведен пример расчета для гипотетической скважины и показана ожидаемая экономия электрической энергии в случае применения преобразователя частоты. Рассмотрены напорные характеристики плунжерных насосов и получено аналитическое выражение для определения средней за период качания потребляемой мощности асинхронным двигателем ШСНУ. Поскольку потребляемая активная и реактивная мощности асинхронного двигателя ШСНУ зависят от скорости вращения, найдено аналитическое выражение, позволяющее рассчитать среднюю скорость при вариации напряжения статора с учетом напорной характеристики плунжерного насоса и кинематики исполнительного механизма. Определены также аналитические зависимости для определения скорости погружных асинхронных двигателей (ПЭД) и потребляемой мощности при вариации напряжения на входе станцией управле-

ния с учетом напорной характеристики центробежного насоса и особенностей преобразователей частоты.

**В третьей главе** сформулированы возможные критерии оптимизации для поиска оптимального напряжения промышленной подстанции. Рассмотрена гипотетическая отходящая линия с тремя электротехническими комплексами добывающих скважин (ЭКДС), каждый из которых содержит ПЭД, приводящий в движение погружной центробежный насос. Показано, что аналитического решения поиска оптимального напряжения, отвечающему какому-либо критерию оптимизации не существует. В связи с этим разработан алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для отходящей линии, содержащей произвольное количество ЭКДС с погружными центробежными насосами, но без преобразователей частоты в станциях управления. Приведены примеры расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для конкретных вариантов комплектации ЭКДС рассматриваемого типа. Показано, что регулирование напряжения промышленной подстанции позволяет снизить потребление активной мощности до 6 %, а полной мощности – до 18 %, что значительно повышает энергетическую эффективность добычи нефти. Рассмотрена отходящая линия с тремя ЭКДС со штанговыми скважинными насосными установками. Разработан алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для отходящей линии, содержащей произвольное количество ЭКДС с ШСНУ. Приведены примеры расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию такого типа. Приведен также пример расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию с ЭКДС с погружными центробежными насосами, станции управления которых оснащены преобразователями частоты. Показано, что алгоритм расчета в этом случае имеет свои особенности, связанные с функциональными возможностями преобразователей частоты. Анализ расчетных данных показал, что оптимальная величина напряжения промышленной подстанции может находиться в широких пределах в зависимости от комплектации электротехнических

комплексов добывающих скважин. В связи с этим разработан универсальный алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, учитывающий широкий спектр комплектаций ЭКДС с различными типами насосов и позволяющий производить оптимизацию по любому критерию. Алгоритм содержит несколько циклов: цикл перебора напряжения на самом удаленном двигателе или станции управления; цикл перебора узлов отходящей линии и цикл перебора напряжения на двигателе или станции управления, подключенным к каждому узлу.

**В четвертой главе** показано, что трансформаторы с РПН, используемые на промышленной подстанции имеют свою дискретность регулирования напряжения. Поэтому предложено выбирать такую ступень регулирования, которая дает ближайшее к оптимальному значение напряжения. В связи с этим разработан алгоритм расчета для прогнозирования ожидаемых квазиоптимальных потерь на элементах ЭКДС отходящей линии и потребляемой от промышленной подстанции мощности с учетом дискретности регулирования напряжения. Он базируется на разработанном в третьей главе универсальном алгоритме расчета оптимального напряжения, но отличается тем, что вычисления заканчиваются после уравнивания расчетного значения напряжения промышленной подстанции с выбранной величиной напряжения ступени регулирования трансформатора с РПН. Для оценки адекватности теоретических исследований и разработанных алгоритмов расчета рассмотрена реальная отходящая линия нефтяного промысла. Показано, что для расчета оптимального напряжения промышленной подстанции необходимо произвести подготовку исходных данных, связанных с параметрами погружных насосов, двигателей, трансформаторов, воздушных и кабельных линий. Проведено компьютерное моделирование всех электродвигателей, приводящих в движение погружные насосы рассматриваемой отходящей линии, необходимое для определения коэффициентов, связывающих изменение скорости двигателей с вариацией напряжения на статоре. С помощью разработанного алгоритма произведен расчет оптимального напряжения промышленной подстанции и выбрана сту-

пень регулирования трансформатора с РПН, дающего ближайшее большее напряжение. Приведены результаты расчета прогнозируемой потребляемой от промышленной подстанции активной мощности на этой ступени регулирования. Показано, что обоснованный выбор напряжения для рассматриваемой отходящей линии позволил снизить удельные затраты активной мощности на добычу кубометра жидкости на 3,3 %, а полной мощности – на 25 %. Следовательно, регулирование напряжения промышленной подстанции и обеспечение оптимального напряжения повышает энергетическую эффективность механизированной добычи нефти. Произведен также расчет потребляемой от промышленной подстанции активной мощности при выводе одной из скважин в ремонт. Сравнение результатов расчета с фактическими данными, полученными с промышленной подстанции, показывает, что погрешность расчета не превышает 2,8 %. В итоге сформулирована универсальная методика определения оптимального напряжения промышленной подстанции и ожидаемого потребления электрической энергии с учетом дискретности регулирования напряжения трансформаторами с РПН, которая содержит ряд действий, связанных с моделированием и подготовкой исходных данных, и собственно расчет с использованием разработанных алгоритмов.

## **1 ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ НЕФТИ**

### **1.1 Особенности схем электроснабжения электротехнических комплексов предприятий нефтедобывающей промышленности**

Электроэнергетические сети предприятий нефтегазодобывающей промышленности имеют радиально-магистральную и радиальную схемы соединения с последовательными многоступенчатыми трансформациями. При этом используются номинальные уровни напряжения – 220 кВ, 110 кВ, 35 кВ, 10 кВ, 6 кВ. Напряжения 10 и 6 кВ трансформируются на 0,4 кВ и далее на нестандартные значения напряжения. Линии электропередачи (ЛЭП) выполняются проводами марки АС и СИП-3 с сечением 50 мм<sup>2</sup>, 70 мм<sup>2</sup>, 95 мм<sup>2</sup>, 120 мм<sup>2</sup> и 150 мм<sup>2</sup>.

Электротехнический комплекс нефтедобывающего предприятия содержит, как правило, главную понизительную подстанцию или промышленную подстанцию. Нефтедобывающие предприятия относятся ко второй категории надежности и имеют два независимых источника питания, т.е. два силовых трансформатора с номинальной мощностью от 2500 до 10000 кВА каждый.

В качестве электротехнического комплекса такого предприятия рассматривается один ввод силового трансформатора, к которому подключены электротехнические комплексы отходящих линий, электротехнические комплексы добывающих скважин и вспомогательные электротехнические комплексы. Вспомогательные электротехнические комплексы включают в себя дожимные насосные станции (ДНС), кустовые насосные станции (КНС) и буровые установки (БУ), которые могут быть подключены к общей ЛЭП в любой ее точке в зависимости от геологических условий (рисунок 2).

Несколько электротехнических комплексов предприятия, территориально сосредоточенных в одном районе, являются электрической нагрузкой узловой подстанции. Узловая подстанция также имеет два независимых ис-

точника с номинальной мощностью трансформаторов от 25000 кВА до 100000 кВА каждый.

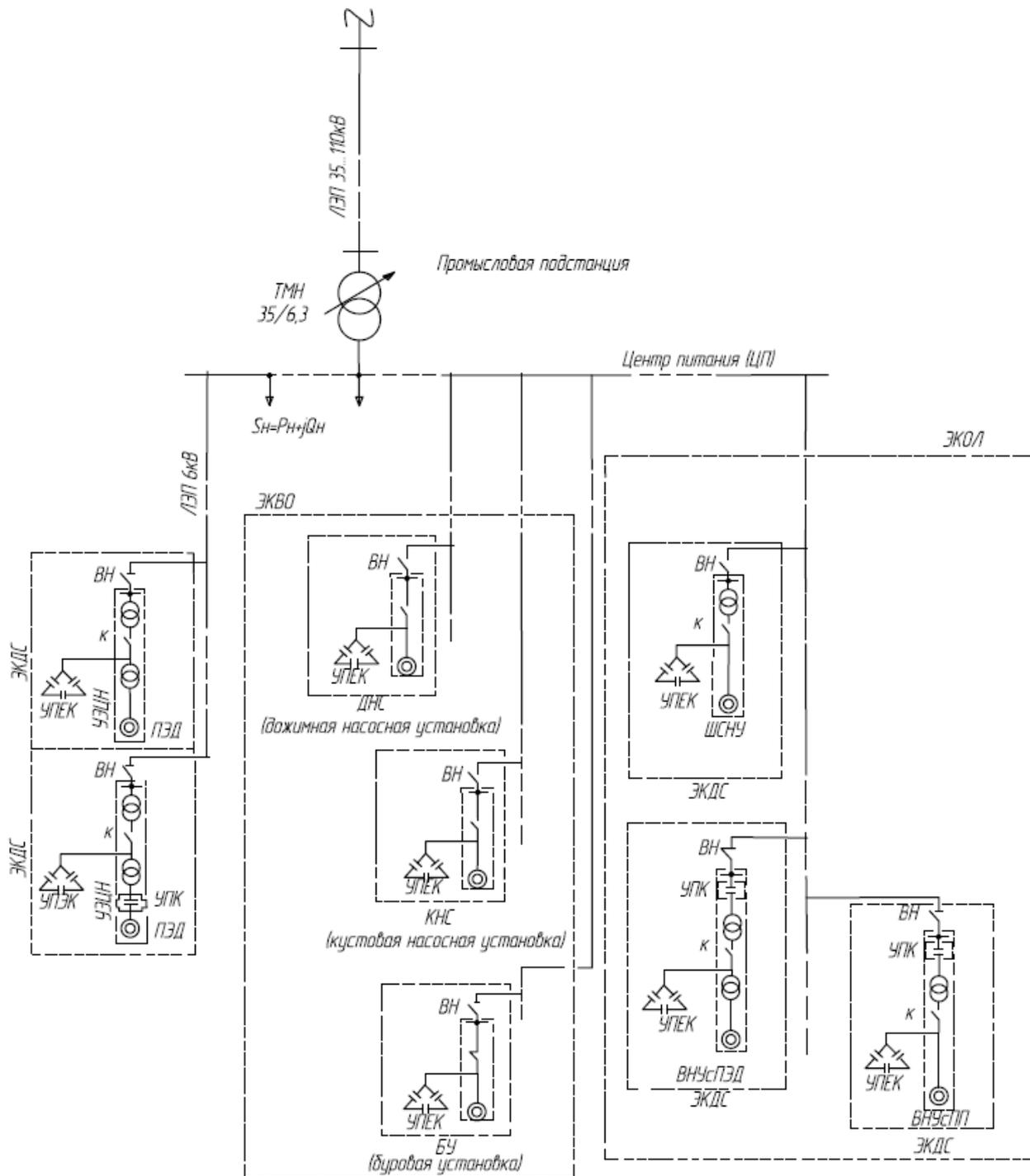


Рисунок 2 – Схема системы электроснабжения электротехнического комплекса предприятия нефтедобывающей промышленности

В ЭКДС используются различные варианты насосов и их приводов – винтовые насосные установки с погружным асинхронным электродвигателем (ВНУ с ПЭД), винтовые насосные установки с поверхностным приводом

(ВНУ с ПП), штанговые скважинные насосные установки (ШСНУ) и установки электроцентробежных насосов с погружными асинхронными электродвигателями (УЭЦН с ПЭД).

К каждой отходящей линии подключены от 10 до 25 электротехнических комплексов добывающих скважин (ЭКДС). Средняя длина отходящей линии 6 км, длина отпаяк до 2 км [52].

В качестве электроприводов насосов в ЭКДС используются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором или погружные электродвигатели (ПЭД).

В качестве наземного электропривода применяются взрывозащищенные асинхронные электродвигатели общепромышленного исполнения с короткозамкнутым ротором с повышенным моментом мощностью 5,5-55 кВт. Диапазон мощностей ПЭД гораздо шире. Несколько заводов на территории Российской Федерации выпускают погружные асинхронные двигатели мощностью 12-750 кВт.

Штанговые скважинные насосные установки комплектуются АД с короткозамкнутым ротором, установки электроцентробежного насоса комплектуются ПЭД, а винтовые насосные установки могут комплектоваться как АД общепромышленного исполнения, так и ПЭД. ШСНУ с наземным электроприводом подключаются к отходящей линии через один индивидуальный трансформатор (рисунок 3, а). УЭЦН и ВНУ с погружным электроприводом подключаются к отходящей линии либо через два индивидуальных двухобмоточных трансформатора (рисунок 3, б), либо через один трехобмоточный. При этом в первом варианте подключения к сети, первый силовой трансформатор имеет номинальное напряжение 6000(10000)/380 В, а второй трансформатор имеет номинальное первичное напряжение 380 В, а вторичное – нестандартное напряжение, зависящее от мощности и исполнения погружного электродвигателя. Во втором варианте подключения к сети трехобмоточный трансформатор имеет одну обмотку с нестандартным напряжением.

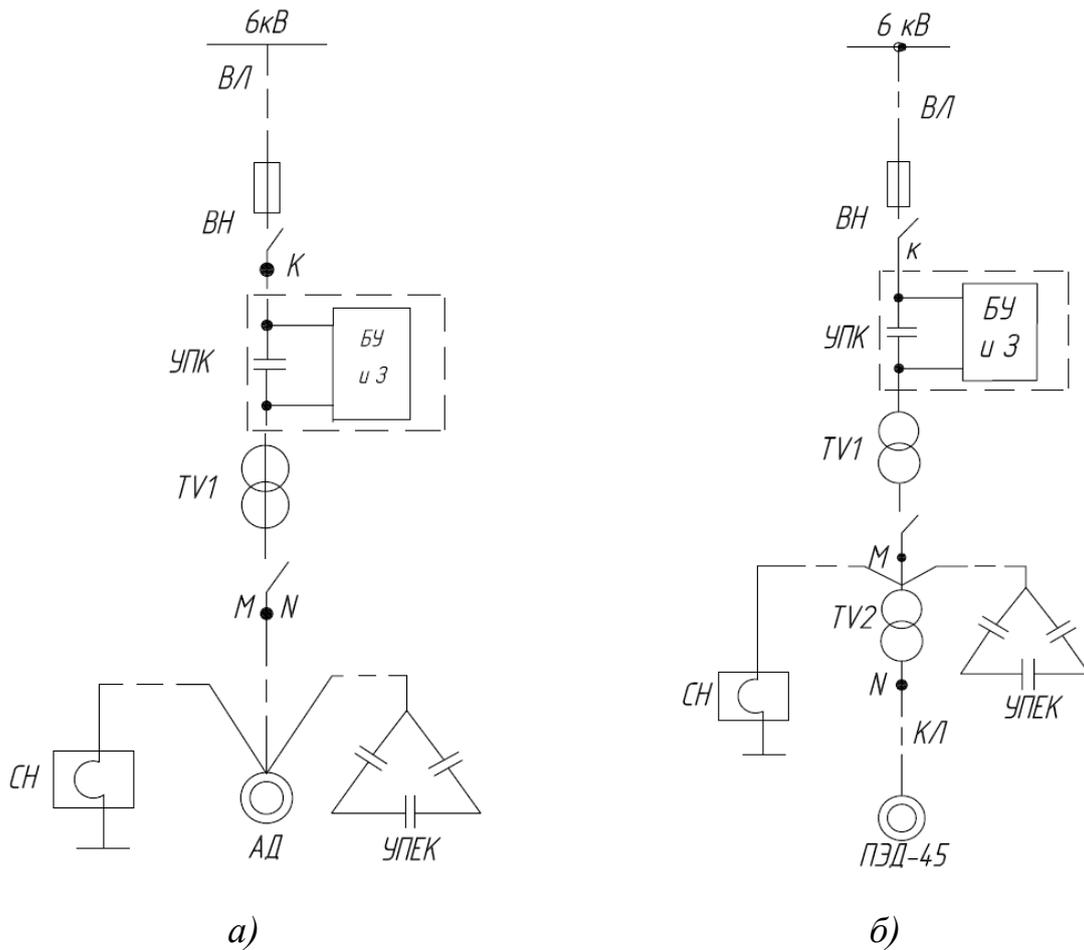


Рисунок 3 – Принципиальная однолинейная схема электроснабжения ЭКДС:  
 а) с поверхностным электроприводом; б) с погружным электроприводом

Дожимные и кустовые насосные станции комплектуются, соответственно, взрывозащищенными асинхронными электродвигателями номинальной мощностью от 200 до 400 кВт и синхронными электродвигателями с номинальной мощностью от 1250 кВт до 1600 кВт на напряжение 6 кВ [52].

Оптимизация величины напряжения и объема электропотребления ЭКДС предполагает решение определенной задачи по нахождению величины какого-то критерия оптимизации. При этом необходимо знать математическую модель электротехнического комплекса добывающей скважины и системы электроснабжения как объекта управления.

## 1.2 Анализ направлений повышения энергетической эффективности добычи нефти

Направления (мероприятия) повышения энергетической эффективности добычи нефти, перечисленные выше можно разделить на пять основных групп. В первую по значимости достижимого эффекта входит энергоэффективный дизайн установок электроцентробежных насосов, во вторую – применение насосов и электрооборудования с более высоким КПД, в третью – использование электродвигателей и трансформаторов меньшей установленной мощности, в четвертую – применение конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности и в пятую – использование преобразователей частоты в станциях управления погружными насосами.

Если весь суммарный эффект энергосбережения от перечисленных мероприятий принять за 100 %, то энергоэффективный дизайн установок электроцентробежных насосов по известным оценкам может принести до 60 % экономии [53]. Действительно, суть энергоэффективного дизайна установки центробежного насоса с ПЭД заключается в попытке оптимального подбора оборудования скважины и элементов ЭКДС, чтобы оно работало с максимальными КПД, коэффициентом мощности и наименьшими потерями. Для этого необходимо знать, что скважина, оснащенная погружным электроцентробежным насосом, представляет собой обсадную колонну 2, которая посредством перфорированных отверстий имеет гидравлическую связь с пластом 1 (рисунок 4) [54]. Внутри обсадной колонны, на глубине  $H_{cn}$  находится погружной электроцентробежный насос 4 с асинхронным короткозамкнутым двигателем 3. Головка насоса крепится к колонне насосно-компрессорных труб (НКТ) 6, которая служит для транспортирования откачиваемой продукции на поверхность. Внутри НКТ находится обратный клапан 5. Он предотвращает слив жидкости в случае остановки насоса. Верхняя часть НКТ крепится на устье скважины. Питание двигателя осуществляется от повышающего трансформатора 12 с помощью кабеля 7. Запуск и отклю-

чение погружного насоса обеспечивает станция управления 13. Выкидная линия 10 служит для соединения НКТ с магистральным трубопроводом и содержит задвижку 9. Для контроля за устьевым и затрубным давлением используются манометры 8 и 11.

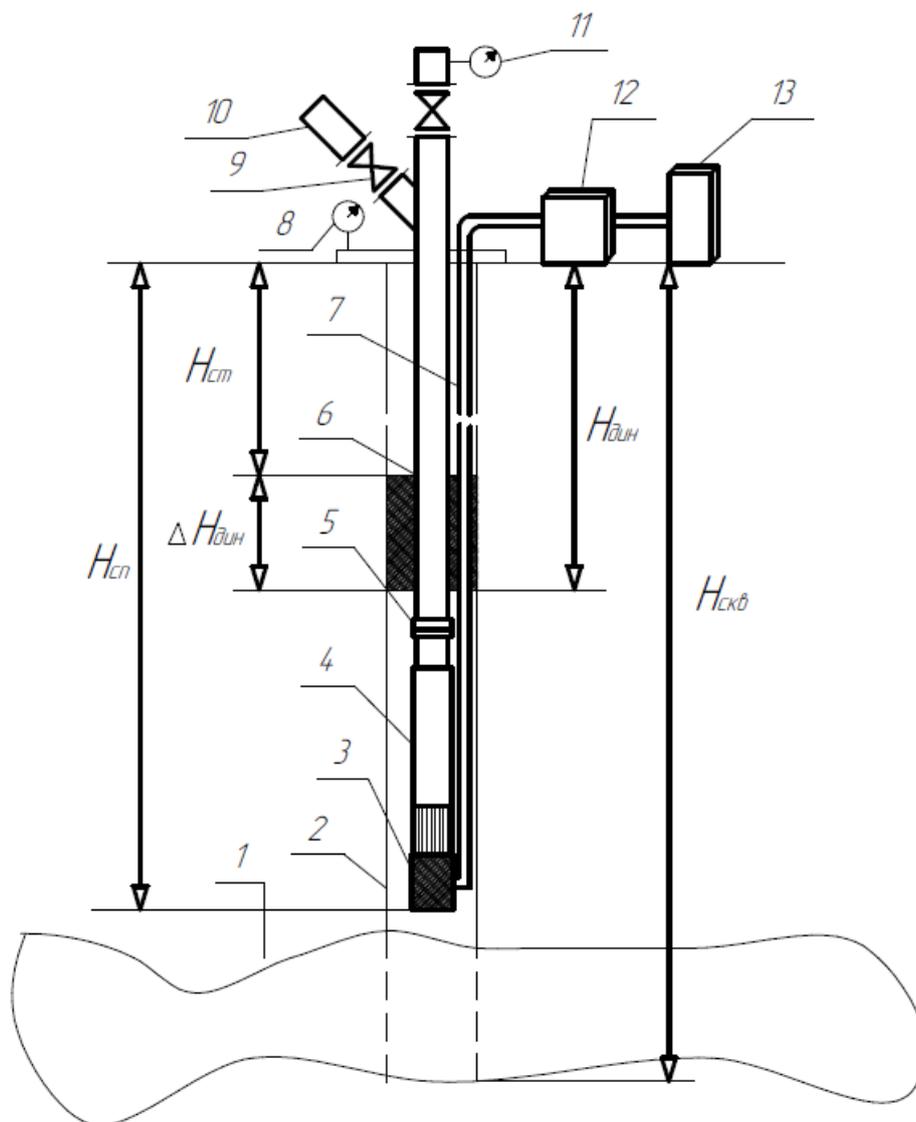


Рисунок 4 – Скважина, оснащенная погружным электроцентробежным насосом

Выбор варианта комплектации погружной установки начинается с насоса, напор  $H_{нас}$  и подача  $Q_{нас}$  которого должны соответствовать глубине  $H_{сп}$  спуска и, в идеале, притоку  $Q_{пл}$  жидкости из нефтяного пласта. Тогда погружной насос будет работать с максимальным КПД  $\eta_{нас}$  полезного действия.

Глубина спуска определяется по формуле [53]

$$H_{cn} = H_{дин}^{mp} + H_n, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $H_{дин}^{mp}$  – заданная технологами величина динамического уровня жидкости, соответствующая требуемому дебиту  $Q_{mp}$  скважины, измеряемому в м<sup>3</sup>/сутки;  $H_n$  – глубина погружения насоса под динамический уровень, обеспечивающая необходимое давление насыщения и соответствующее газо-содержание на входе в насос.

При выходе на стационарный режим работы с заданным динамическим уровнем  $H_{дин}^{mp}$  дебит скважины будет соответствовать притоку жидкости из нефтяного пласта, и в идеале производительность насоса должна быть равна

$$\left. \begin{aligned} Q_{нас}^{onm} = Q_{mp} = Q_{nl} = k_{np} (H_{дин}^{mp} - H_{ст}); \\ H_{нас}^{onm} = H_{дин} + H_{mp} + \frac{P_{буф}}{\rho g} - H_z, \end{aligned} \right\}, \text{ м}^3/\text{сутки}, \quad (2)$$

где  $k_{np}$  – коэффициент продуктивности нефтяного пласта, м<sup>3</sup>/Па·сут.;  $H_{ст}$  – статический уровень жидкости в скважине, м;  $P_{буф}$  – буферное давление на устье скважины;  $\rho$  – плотность нефтяной смеси;  $g$  – ускорение свободного падения.

$$Q_{нас.в}^{onm} = \frac{Q_{нас}^{onm}}{K_{Qv} K_{Q\beta}}, \text{ м}^3/\text{сутки}; \quad H_{нас.в}^{onm} = \frac{H_{нас}^{onm}}{K_{Hv} K_{H\beta}}, \text{ м}, \quad (3)$$

где  $K_{Qv}$  и  $K_{Q\beta}$  – коэффициенты, учитывающие изменение производительности насоса под влиянием вязкости и газосодержания жидкости, соответственно;  $K_{Hv}$  и  $K_{H\beta}$  – коэффициенты, характеризующие изменение напора насоса под влиянием вязкости и газосодержания [55].

Формулы (2) и (3) определяют требуемые производительность  $Q_{нас}^{onm}$  и напор  $H_{нас}^{onm}$  насоса при откачке из скважины жидкости с определенной вязкостью  $v$  и газосодержанием  $\beta$ . В каталогах же приводятся напорные характеристики погружных насосов при работе на воде. Вследствие этого для вы-

бора насоса необходимо провести пересчет требуемого напора и производительности насоса [55].

Тем не менее, ориентируясь на агрегат с максимальным КПД, можно определить необходимую минимальную мощность электродвигателя для обеспечения требуемого дебита скважины

$$P_{\text{дв.ном}}^{\text{опт}} = 10^{-3} \cdot \frac{K_p H_{\text{нас}}^{Q_{mp}} Q_{mp} \rho g}{86400 \eta_{\text{нас.в}}^{Q_{mp}} K_{\eta}}, \text{ кВт}, \quad (4)$$

где  $K_{\eta}$  – поправочный коэффициент, учитывающий снижение КПД насоса при работе с жидкостью определенной вязкости и газосодержанием [55, 56];  $K_p$  – коэффициент запаса по мощности, необходимый для обеспечения откачки во время освоения скважины жидкости глушения, имеющей большую плотность, чем добываемая нефтяная смесь.

Значения, полученные при расчете по формулам (1) – (4), используются для выбора погружного центробежного насоса и двигателя. При этом следует ожидать, что и насос, и двигатель будут работать с максимальными КПД, что и приводит в конечном итоге к экономии электрической энергии.

Однако, как правило, точного подбора оборудования по полученным данным осуществить не получается. Это связано с тем, что погружное оборудование выпускается заводами-изготовителями с определенным шагом.

При выборе насоса с производительностью меньше  $Q_{\text{нас.в}}^{\text{опт}}$  установка может работать продолжительное время и обеспечивать дебит скважины меньше требуемого. При выборе насоса с производительностью больше, чем  $Q_{\text{нас}}^{\text{опт}}$ , очевидно, что установка погружного насоса должна будет работать в циклическом режиме пуска работы на номинальной скорости и остановки, если ее не оснастить преобразователем частоты. Применение же частотно-регулируемого электропривода позволяет длительно эксплуатировать скважину с требуемым дебитом  $Q_{mp}$ .

Полученное по формуле (4) значение используют для выбора из каталога электродвигателя ближайшей большей мощности, причем для уменьше-

ния потерь в соединительном кабеле номинальное напряжение  $U_{1ном}$  статора должно быть максимальным.

Погружные электродвигатели разных производителей отличаются конструктивным исполнением (например, наряду с асинхронными выпускают так называемые вентильные двигатели) и КПД. Очевидно, что для повышения энергетической эффективности установок для добычи нефти необходимо выбирать электродвигатели с максимальным КПД. Однако следует иметь в виду, что погружные двигатели также выпускаются с достаточно большим шагом по мощности [57]. Отличие номинальной мощности электродвигателя от значения, полученного по формуле (4), приведет к дополнительному расходу электроэнергии.

Повышающий трансформатор также выбирается ближайший по мощности с учетом полной мощности, потребляемой ПЭД, и потерь активной и реактивной мощности на соединительном кабеле. Причем для уменьшения потерь на кабеле его сечение выбирается как можно большим.

Все перечисленные мероприятия, направленные на сбережение электрической энергии, связаны между собой. Применение насосов с более высоким КПД позволяет использовать электродвигатели меньшей установленной мощности, а если к тому же применить в установке электроцентробежного насоса электродвигатель более высокого класса энергетической эффективности, то можно добиться снижения установленной мощности трансформатора.

Кроме того, применение энергоэффективных силовых распределительных трансформаторов в схеме электроснабжения ЭКДС, таких как трансформаторов с аморфным магнитопроводом и обмотками из сверхпроводникового материала позволит снизить потери распределительной сети в целом. Применение в таких трансформаторах магнитопровода, выполненного из аморфного сплава позволяет значительно снизить потери холостого хода трансформатора. Обмотки трансформатора, выполненные из сверхпроводниковых материалов, позволяют значительно снизить нагрузочные потери трансформатора. Кроме этого трансформаторы со сверхпроводниковыми об-

мотками обладают такими преимуществами как возможность ограничения токов короткого замыкания, меньшие массогабаритные показатели, экологическая безопасность, пожаробезопасность и др [58, 59].

Суммарный ожидаемый вклад в повышение энергетической эффективности от применения насосов и ПЭД с повышенным КПД оценивается в 10 %, а увеличение сечения соединительного кабеля – в 16 % [60].

Использование индивидуальных конденсаторных батарей, устанавливаемых на ПЭД для компенсации потребляемой двигателем реактивной мощности, приводит к снижению потерь на соединительном кабеле, причем значительный эффект достигается при большой глубине спуска. Снижение потерь можно оценить по формуле [59]:

$$\Delta(\Delta P_{кл}) = 3 \cdot 10^{-3} I_1^2 R_{кл} (1 - \cos^2 \varphi), \quad (5)$$

где  $\Delta P_{кл}$  – активные потери мощности на соединительном кабеле;  $R_{кл}$  – активное сопротивление кабеля;  $I_1$  – фазный ток двигателя;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности двигателя.

Применение преобразователей частоты, как правило, решает технологические задачи плавного пуска электродвигателя, увеличения межремонтного периода скважины и поддержания необходимого динамического уровня жидкости. Но с позиций экономии электрической энергии его применение неоднозначно и требует дополнительных исследований поскольку преобразователь частоты имеет свой КПД, который у лучших мировых образцов не превышает величины 0,97. Кроме того, как правило, на выходе преобразователя приходится ставить синусные фильтры, которые также имеют свой КПД, то есть увеличивают потери. Следует также учитывать, что за счет действия высших гармоник в выходном напряжении преобразователя частоты увеличиваются потери в повышающем трансформаторе и погружном электродвигателе [61].

Как видно, типовые направления повышения энергетической эффективности электротехнического комплекса добычи нефти не предусматривают

регулирования напряжения промышленной подстанции, хотя работы в этом направлении ведутся [62].

### 1.3 Математическая модель погружных асинхронных электродвигателей и двигателей штанговых скважинных насосных установок, адаптированная к задачам определения влияния действующего значения напряжения на их работу

Независимо от того, применяется в станции управления преобразователь частоты или нет, движение асинхронного двигателя при линейном законе регулирования напряжения в функции частоты описывается системой уравнений [63, 64]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{1x}}{dt} &= U_{1x} - \frac{R_1 L_2'}{\Delta} \psi_{1x} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{2x} + \omega_0 \psi_{1y}; \\ \frac{d\psi_{1y}}{dt} &= U_{1y} - \frac{R_1 L_2'}{\Delta} \psi_{1y} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{2y} - \omega_0 \psi_{1x}; \\ \frac{d\psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R_2' L_1}{\Delta} \psi_{2x} + \frac{R_2' L_0}{\Delta} \psi_{1x} + (\omega_0 - \omega) \psi_{2y}; \\ \frac{d\psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R_2' L_1}{\Delta} \psi_{2y} + \frac{R_2' L_0}{\Delta} \psi_{1y} - (\omega_0 - \omega) \psi_{2x}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{m_1 Z_n L_0}{2J_{np} \Delta} (\psi_{1y} \psi_{2x} - \psi_{1x} \psi_{2y}) - \frac{1}{J_{np}} M_c; \\ U_{1x} &= k_{U1} f_1 + U_0; \\ U_{1y} &= k_{U1} f_1 + U_0; \\ \omega_0 &= \frac{2\pi f_1}{Z_n}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\psi_{1x}$  и  $\psi_{1y}$  – проекции вектора потокосцепления статора в ортогональной системе координат  $Oxy$ , вращающейся со скоростью магнитного поля;  $U_{1x}$  и  $U_{1y}$  – проекции изображающего вектора фазного напряжения в той же системе координат;  $\psi_{2x}$  и  $\psi_{2y}$  – соответствующие проекции вектора потокосцепления ротора;  $L_1$  и  $R_1$  – индуктивность и активное сопротивление цепи ста-

тора;  $L'_2$  и  $R'_2$  – приведенные индуктивность и активное сопротивление цепи ротора;  $L_0$  – взаимная индуктивность;  $\omega_0$  – угловая скорость вращения магнитного поля;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора двигателя;  $J_{np}$  – приведенный момент инерции ротора;  $m_1$  – число фаз электродвигателя;  $Z_n$  – число пар полюсов;  $M_c$  – момент сопротивления на валу погружного электродвигателя;  $\Delta = L_1 L'_2 - L_0^2$ ;  $f_1$  – частота питающего напряжения;  $k_{U1}$  – коэффициент пропорциональности,  $U_0$  – напряжение при нулевой частоте;  $t$  – время.

Система уравнений (6) предполагает, что в станции управления погружным насосом применен частотный преобразователь с линейным законом регулирования напряжения в функции частоты. В случае его отсутствия значение частоты питающего напряжения принимается равным  $f_1 = 50$  Гц, а напряжение при нулевой частоте –  $U_0 = 0$  В.

Следует также отметить, что система уравнений (6) является нелинейной, поскольку в ней наблюдаются такие произведения переменных, как  $\omega_0 \psi_{1y}$ ,  $\omega_0 \psi_{1x}$ ,  $(\omega_0 - \omega) \psi_{2y}$ ,  $(\omega_0 - \omega) \psi_{2x}$ ,  $\psi_{1y} \psi_{2x}$  и  $\psi_{1x} \psi_{2y}$ . Линеаризация этих уравнений позволяет найти передаточную функцию асинхронного двигателя как погружного, так и наземного по отношению к изменению напряжения. При этом для решения задач, учитывающих влияние изменения действующего напряжения на статоре двигателя на его скорость и потребление активной и реактивной мощности достаточно знать коэффициент передачи этой функции, который определяется формулой [52]:

$$k_{du}^U = \frac{\Delta \omega_2}{\Delta U_1} = \frac{A_{71} A_{65} + A_{62} A_{76}}{A_{71} A_{84} + A_{63} A_{76}}, \quad (7)$$

где  $A_{62} = (1 + B^2 - DF)(AB - C)D + A_{20} A_{30}$ ;

$$A_{63} = \left[ \psi_{2y0} A_{20} + \psi_{2x0} (1 + B^2 - DF) \right] (1 + B^2) T_2;$$

$$A_{65} = A_{30} \left[ (1 + B^2) \psi_{1y0} - BF \psi_{2x0} - F \psi_{2y0} \right] + \\ + (1 + B^2 - DF) \left[ (C - AB) \psi_{2x0} - (A + BC) \psi_{2y0} \right];$$

$$A_{71} = (1 + B^2 - DF)^2 + A_{20}^2;$$

$$A_{76} = (1 + B^2 - DF) \left[ (1 + B^2) \psi_{1x0} - F \psi_{2x0} + BF \psi_{2y0} \right] - \\ - A_{20} \left[ (1 + B^2) \psi_{1y0} - BF \psi_{2x0} - F \psi_{2y0} \right];$$

$$A_{84} = (1 + B^2) \psi_{2y0} \left[ (1 + B^2) \psi_{1y0} - F \psi_{2y0} - BF \psi_{2x0} \right] T_2;$$

$$A = C = T_1; B = \frac{2\pi T_1 f_{10}}{Z_p}; D = \frac{L_0}{L_1}; F = \frac{L_0}{L_2}; H = \frac{2\pi T_2 f_{10}}{Z_n};$$

$$A_{20} = (H - T_2 \omega_{00}) (1 + B^2) + BDF; A_{30} = D(A + BC),$$

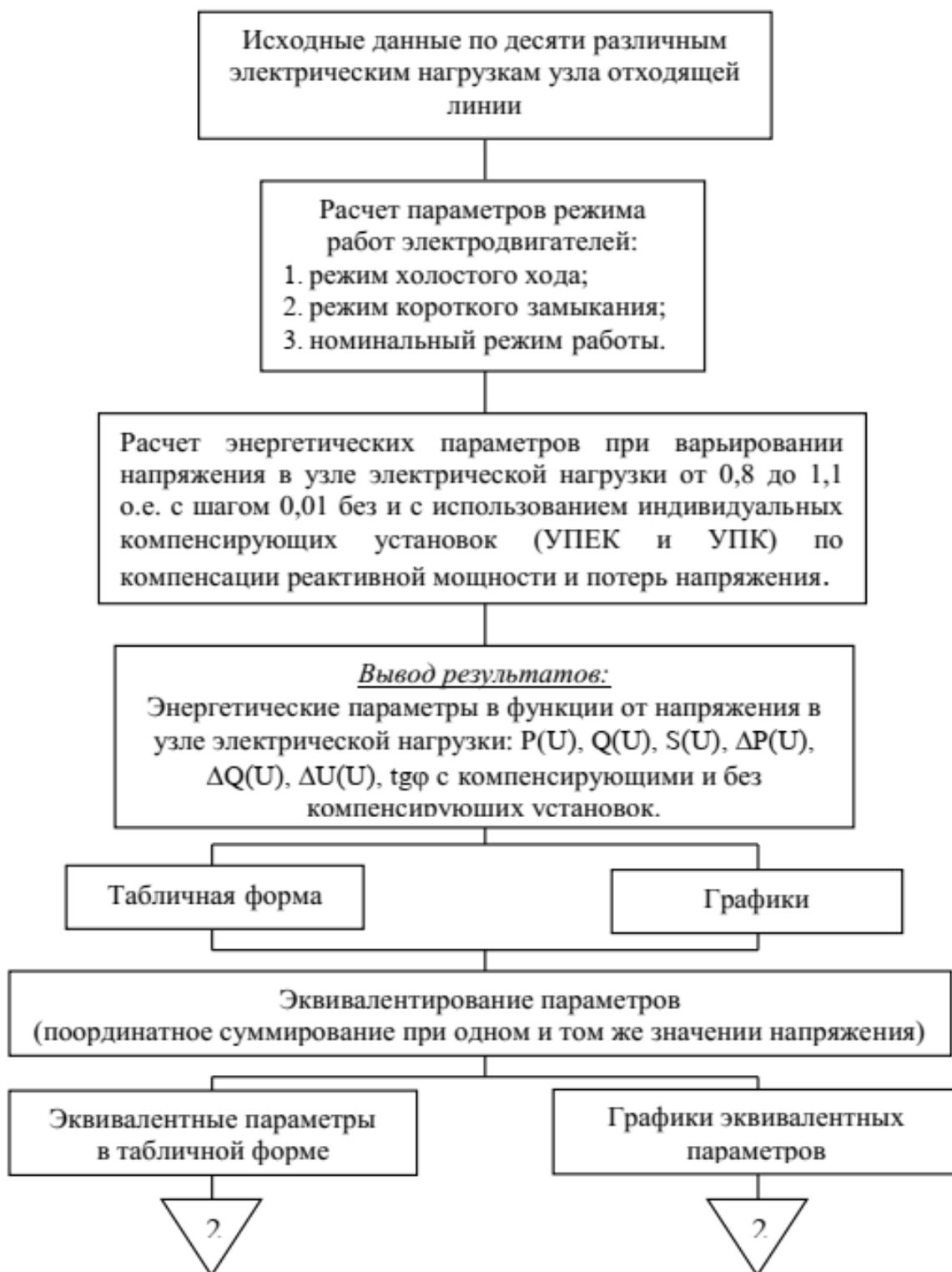
где  $\omega_{00}$  и  $f_{10}$  – начальные значения угловой скорости вращения магнитного поля и частоты питающего напряжения;  $\psi_{1x0}$ ,  $\psi_{1y0}$ ,  $\psi_{2x0}$  и  $\psi_{2y0}$  – начальные условия проекций потокосцеплений статора и ротора на вращающуюся вместе с магнитным полем систему координат  $Oxy$ ;  $T_1 = \frac{\Delta}{R_1 L_2'}$ ,  $T_2 = \frac{\Delta}{R_2' L_1}$  – электромагнитные постоянные времени цепей статора и ротора.

Формула (7) применялась для выполнения диссертационного исследования.

#### 1.4 Методы расчета оптимального напряжения промышленной подстанции

Рассмотрим развитие методов определения оптимального напряжения промышленной подстанции в исторической последовательности.

Прежде всего, обратим внимание на метод, основанный на моделировании и расчете потребляемой мощности каждой добывающей скважины при изменении напряжения в узле отходящей линии от  $0,8U_{ном}$  до  $1,1U_{ном}$ , результаты которых в дальнейшем используются для имитационного моделирования и расчета всей отходящей линии (рисунок 5) [4].



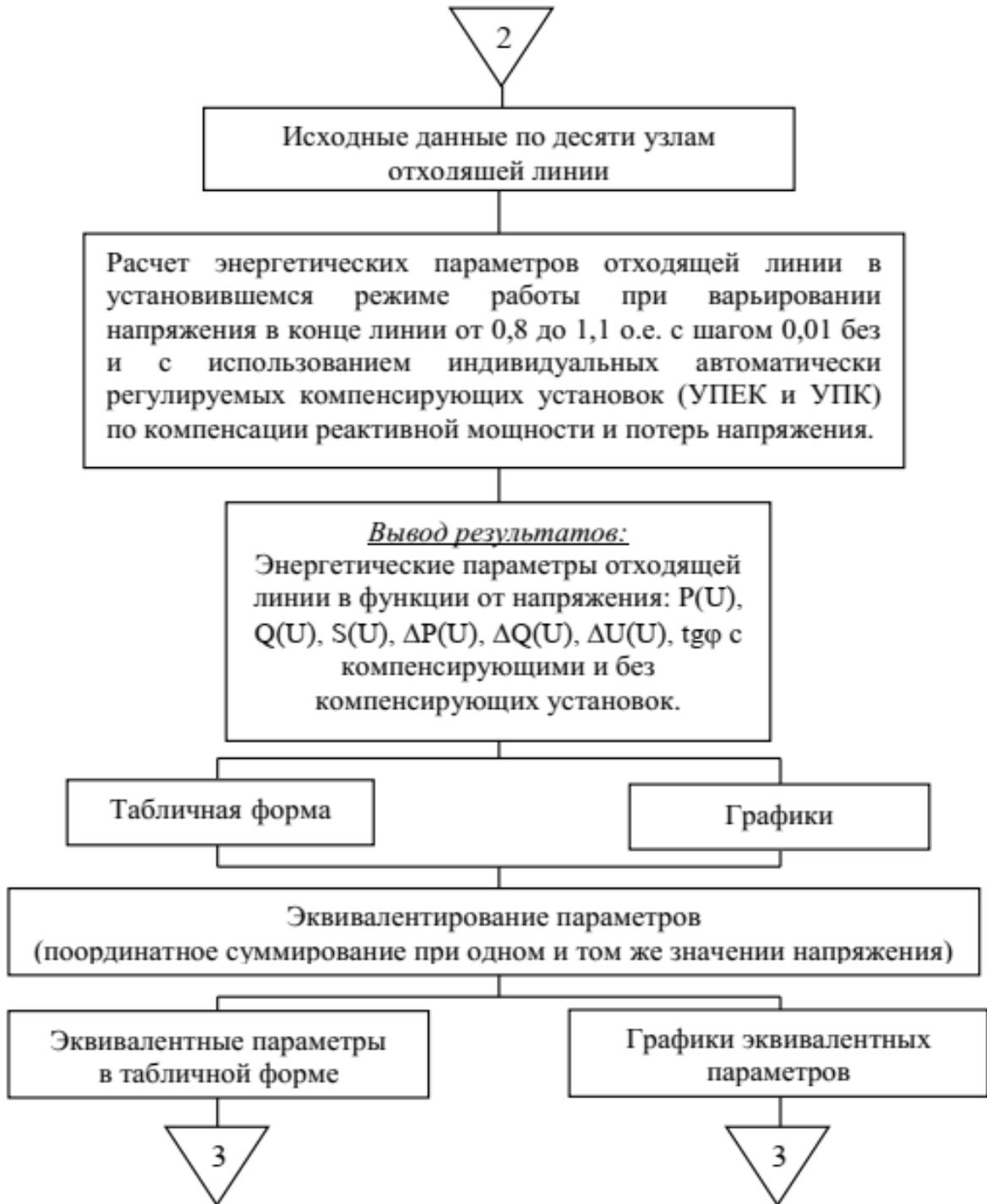


Рисунок 5 – Блок схема алгоритма расчета электротехнического комплекса отходящей линии

Данный метод позволил определить, что оптимальное напряжение промышленной подстанции должно находиться в пределах от  $0,93U_{ном}$  до  $0,95U_{ном}$ . К недостаткам этого метода следует отнести то, что он не учитыва-

ет влияние напорных характеристик погружных насосов на потребляемую мощность и особенностей преобразователей частоты на работу ЭКДС.

Методом компьютерного моделирования с учетом напорных характеристик центробежных насосов и скважин в работе [4] определено, что оптимальная величина напряжения промышленной подстанции с трансформаторами 35/6 кВ находится на максимально допустимом уровне. Однако, такой подход не учитывает тот факт, что с повышением напряжения на статоре выше номинального резко увеличивается потребление ПЭД реактивной мощности, что не может не сказаться на общих потерях на таких элементах ЭКДС, как трансформаторы и соединительный кабель, а также на других элементах отходящей линии.

При исследовании ЭКДС со штанговыми скважинными насосными установками с цепным приводом опять же методом компьютерного моделирования установившихся режимов показано, что для снижения потребления активной и реактивной мощности необходимо поддерживать напряжение промышленной подстанции на уровне  $0,992U_{ном}$  [4]. Однако спектр возможных комплектации ЭКДС более широк, что не позволяет распространить полученный результат на все нефтедобывающие предприятия.

Другой подход заключается в расчете оптимального напряжения промышленной подстанции на основе суточных графиков напряжения и тока нагрузки в центре питания (рисунки 6-7) [3]. При этом за целевую функцию принимается минимум потерь электрической энергии

$$\Delta W = f(U_f, I_f, U_D, I_D, \cos \phi_D) \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $U_f$ ,  $I_f$  и  $U_D$ ,  $I_D$  – действующие значения фактических и заданных уровней напряжения и тока в узле коммерческого учета электрической энергии за заданный и расчетный период времени потребления электрической энергии;  $\cos \phi_D$  – заданный коэффициент мощности.

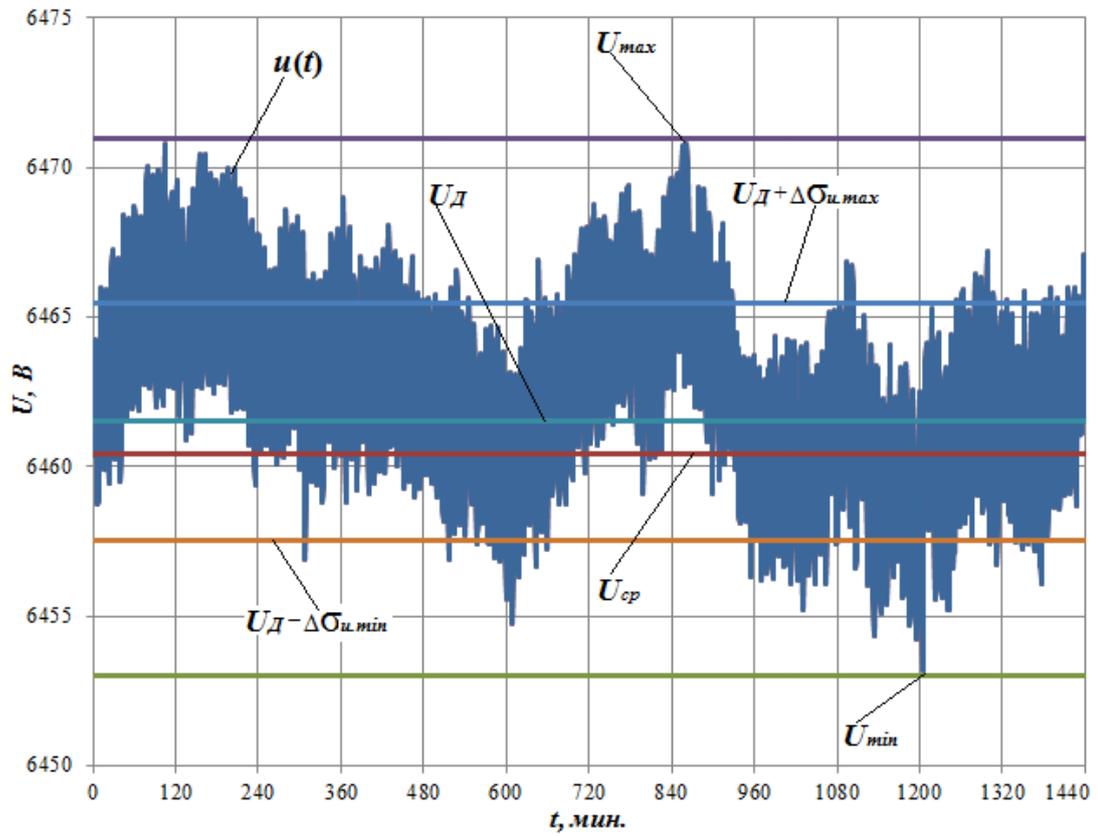


Рисунок 6 – Суточный график напряжения в центре питания

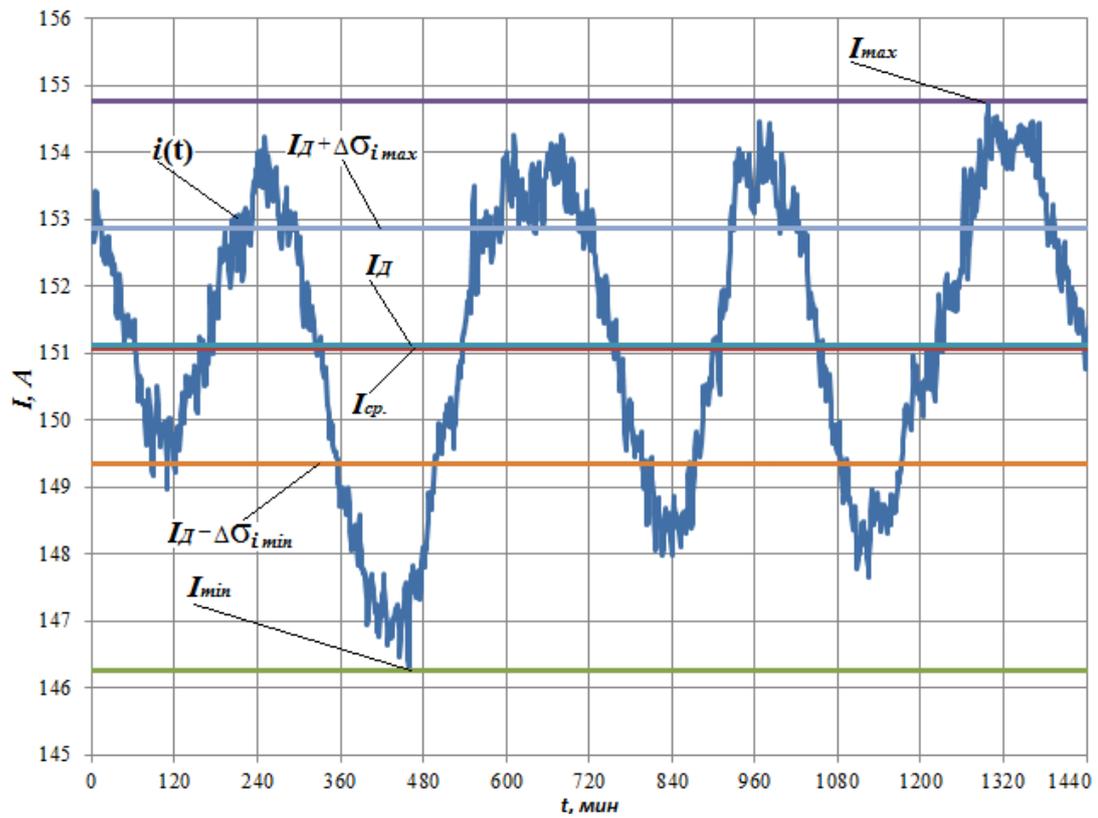


Рисунок 7 – Суточный график тока нагрузки в центре питания

На рисунках 6 и 7 приведены следующие обозначения:  $U_{cp}$  и  $I_{cp}$  – среднесуточные значения напряжения и тока;  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  и  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – максимальные и минимальные отклонения напряжения и тока;  $U_D$ ,  $I_D$  – среднеквадратичные значения напряжения и тока;  $\Delta\sigma_{u,\max}$ ,  $\Delta\sigma_{u,\min}$  и  $\Delta\sigma_{i,\max}$ ,  $\Delta\sigma_{i,\min}$  – среднеквадратичные отклонения значений напряжения и тока;  $U_D + \Delta\sigma_{u,\max}$ ;  $U_D + \Delta\sigma_{u,\min}$ ;  $I_D + \Delta\sigma_{i,\max}$ ;  $I_D + \Delta\sigma_{i,\min}$  – максимальные и минимальные отклонения среднеквадратичных значений напряжения и тока.

Согласно поставленной задаче, требуется найти оптимальное значение текущего напряжения  $U_f$ . При решении этой задачи для целевой функции потерь электрической энергии составляется функция Лагранжа, которая записывается в общем виде следующим образом

$$L(\Delta W(t), \lambda) = \Delta W(t) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi_i \rightarrow \min, \quad (9)$$

где  $\lambda_i$  – множители Лагранжа;  $\phi_i$  – ограничения.

В конечном итоге автором получена система уравнений

$$\left. \begin{aligned} U_f &= C \sum_{i=1}^n \lambda = C \frac{1 - \Delta\sigma_{u,\min} + \Delta\sigma_{u,\max} + \Delta\sigma_{i,\max} - \Delta\sigma_{i,\min}}{3(C - D + A - B)} = G_1; \\ I_f &= A \sum_{i=1}^n \lambda = A \frac{1 - \Delta\sigma_{u,\min} + \Delta\sigma_{u,\max} + \Delta\sigma_{i,\max} - \Delta\sigma_{i,\min}}{3(C - D + A - B)} = G_2; \\ U_D &= D \sum_{i=1}^n \lambda = D \frac{1 - \Delta\sigma_{u,\min} + \Delta\sigma_{u,\max} + \Delta\sigma_{i,\max} - \Delta\sigma_{i,\min}}{3(C - D + A - B)} = G_3; \\ I_D &= B \sum_{i=1}^n \lambda = B \frac{1 - \Delta\sigma_{u,\min} + \Delta\sigma_{u,\max} + \Delta\sigma_{i,\max} - \Delta\sigma_{i,\min}}{3(C - D + A - B)} = G_4; \\ \sum_{i=1}^n \lambda &= \frac{1 - \Delta\sigma_{u,\min} + \Delta\sigma_{u,\max} + \Delta\sigma_{i,\max} - \Delta\sigma_{i,\min}}{3(C - D + A - B)} = G. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\text{где } A = - \frac{3}{t_r \cos \varphi_f - t_s \cos \varphi_f + \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t_r + \varphi_f + 2\psi_{i_f}) - \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t_s + \varphi_f + 2\psi_{i_f})};$$

$$B = - \frac{3}{t_r \cos \varphi_D - t_s \cos \varphi_D + \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t_r + \varphi_D + 2\psi_{i_D}) - \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t_s + \varphi_D + 2\psi_{i_D})};$$

$$C = - \frac{3}{t_r \cos \varphi_f - t_s \cos \varphi + \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t_r + \varphi_f + 2\psi_{i_f}) - \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t_s + \varphi_f + 2\psi_{i_f})};$$

$$D = - \frac{3}{t_r \cos \varphi_D - t_s \cos \varphi_D + \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t_r + \varphi_D + 2\psi_{i_D}) - \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t_s + \varphi_D + 2\psi_{i_D})}.$$

Решение полученной системы уравнений методом Гаусса позволяет определить оптимальный и рациональный уровень напряжения, который необходимо автоматически стабилизировать в центре питания рассматриваемого иерархического уровня с целью обеспечения минимума потерь электрической энергии в распределительной электрической сети [3]. Однако, отсутствие конкретных сведений о том, как влияет изменение напряжения промышленной подстанции на потребление активной и реактивной мощности двигателями, входящими в состав электротехнических комплексов добывающих скважин. Предложенное решение задачи оптимизации может оказаться неустойчивым.

## 1.5 Выводы по первой главе

1. Анализ особенностей схем электроснабжения электротехнических комплексов предприятий нефтедобывающей промышленности показывает, что при решении задачи оптимизации напряжения промышленной подстанции необходимо знать математическую модель электротехнического комплекса добывающей скважины и системы электроснабжения как объекта управления.

2. Анализ существующих направлений повышения энергетической эффективности добычи нефти позволяет сделать вывод, что они не предусматривают регулирования напряжения промышленной подстанции, хотя работы в этом направлении ведутся.

3. Определена математическая модель погружных асинхронных электродвигателей и двигателей штанговых скважинных насосных установок,

наиболее подходящая к задачам определения влияния действующего значения напряжения на их работу

4. Рассмотренные методы расчета оптимального напряжения промышленной подстанции не учитывают совокупное влияние напорных характеристик погружных насосов и особенностей преобразователей частоты станций управления на потребляемую мощность электротехническими комплексами добывающих скважин.

## 2 ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОГРУЖНЫХ НАСОСОВ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ И ВЕЛИЧИНЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН

### 2.1 Напорные характеристики центробежных насосов и их влияние на потребление мощности погружных асинхронных двигателей

Для определения потребления электрической энергии электротехническими комплексами добывающих скважин и энергетической эффективности добычи нефти необходимо знать аналитические зависимости, связывающие мощность на валу погружного насоса со скоростью вращения исполнительного двигателя. Рассмотрим, прежде всего, погружной центробежный насос, который находит широкое применение в нефтедобывающей отрасли.

Центробежный насос обладает нелинейной напорной характеристикой (рисунок 8), которую приближенно можно описать уравнением [1]:

$$H_{нас} = a_1 Q_{нас}^2 + b_1 \omega Q_{нас} + c_1 \omega^2, \quad (11)$$

где  $H_{нас}$  – напор погружного насоса, измеряемый в метрах;  $Q_{нас}$  – его производительность, м<sup>3</sup>/сутки;  $\omega$  – скорость вращения входного вала насоса (скорость ротора исполнительного электродвигателя), рад/с;  $a_1$ ,  $b_1$  и  $c_1$  – коэффициенты, зависящие от конструктивного исполнения.

Характеристика, приведенная на рисунке 8, взята из каталога ООО «Римера» [57], при этом подразумевается, что скорость вращения входного вала насоса  $n_{нас} = 2910$  об/мин при частоте питающего напряжения погружного асинхронного двигателя  $f_1 = 50$  Гц. При вариации частоты и, соответственно, скорости вращения получается следующее семейство напорных характеристик этого насоса (рисунок 9).

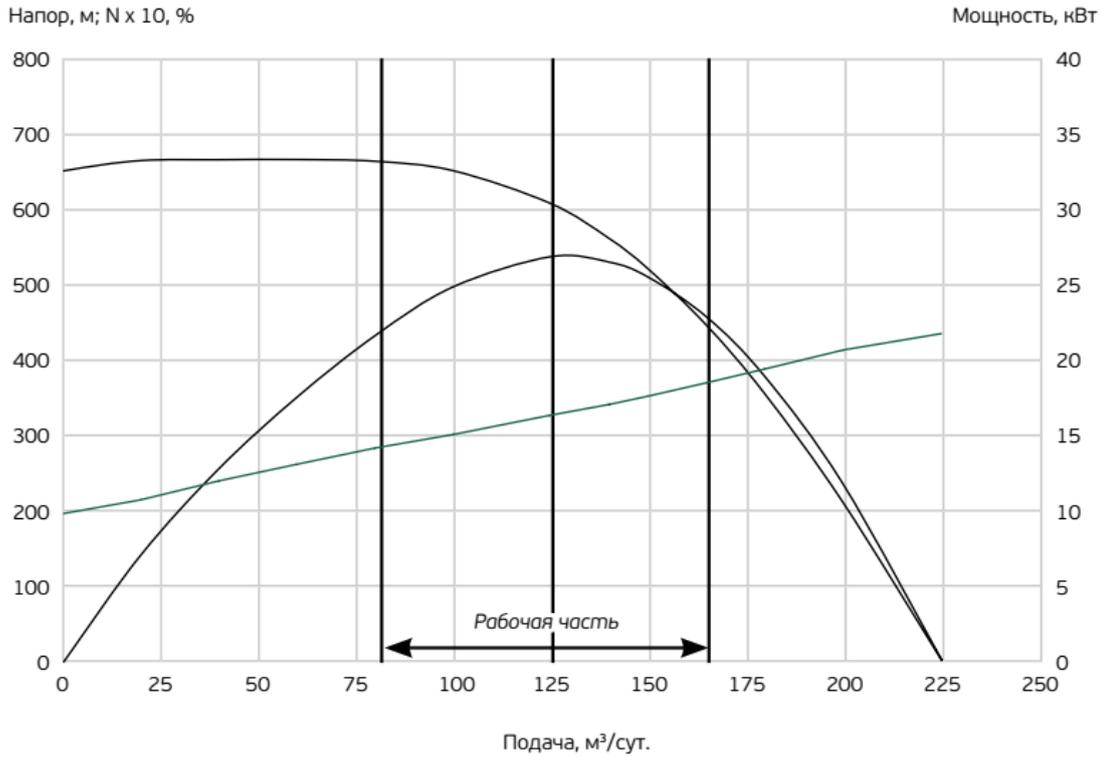


Рисунок 8 – Напорная характеристика центробежного насоса 0215ЭЦНАКИ5-125 при работе на воде плотностью  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$

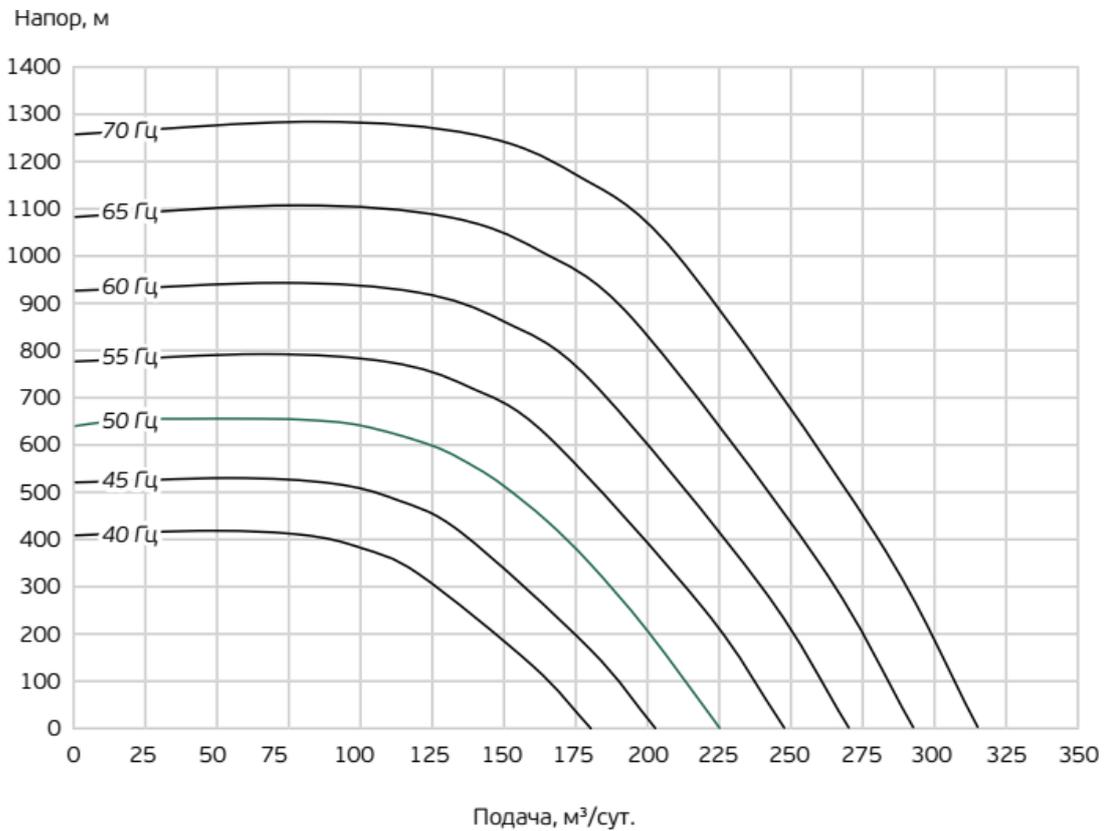


Рисунок 9 – Напорная характеристика центробежного насоса 0215ЭЦНАКИ5-125 при различных скоростях вращения

Из анализа семейств напорных характеристик любого центробежного насоса [1] можно сделать вывод, что напор пропорционален квадрату скорости вращения

$$H_{нас} = k_H \omega^2, \quad (12)$$

где  $k_H$  – коэффициент пропорциональности, а производительность (подача) подчиняется линейной зависимости

$$Q_{нас} = k_Q \omega, \quad (13)$$

где  $k_Q$  – коэффициент, связывающий производительность со скоростью.

Действительно, графики, приведенные на рисунке 9, показывают, что, например, при подаче насоса  $Q_{нас} = 0$  м<sup>3</sup>/сут. напор насоса  $H_{нас}$  изменяется в функции частоты  $f_1$  по следующему закону (таблица 1).

Таблица 1 – Зависимость напор насоса  $H_{нас}$  в функции частоты  $f_1$

$H_{нас}, \text{ м}$	410	520	640	775	926	1082	1256
$f_1, \text{ Гц}$	40	45	50	55	60	65	70

Данные таблицы позволяют определить, что напор, развиваемый рассматриваемым насосом 0215ЭЦНАКИ5-125 при  $Q_{нас} = 0$  м<sup>3</sup>/сут., подчиняется зависимости

$$H_{нас} = k_{Hf} f_1^2, \quad (14)$$

где  $k_{Hf} = 0,256$  м/Гц.

Поскольку характеристики насоса, приведенные на рисунке 8, построены для скорости вращения входного вала насоса  $n_{нас} = 2910$  об/мин, которая должна наблюдаться при частоте питающего напряжения  $f_1 = 50$  Гц, то можно сделать вывод, что действительно напор зависит от скорости  $\omega$  в соответствии с формулой (12), причем  $k_H = 0,00689$  мс/рад. Это объясняется тем, что при частотном управлении погружным асинхронным двигателем можно полагать линейной зависимость между скоростью  $n_{нас}$  от  $f_1$  [8, 63, 64]

$$n_{нас} = k_n f_1, \quad (15)$$

причем для рассматриваемого случая  $k_n = 58,2$  об/мин·Гц.

С другой стороны

$$\omega = \frac{\pi n_{нас}}{30}, \quad (16)$$

поэтому, подставляя (15) в (16), получим

$$\omega = \frac{\pi k_n f_1}{30}. \quad (17)$$

Выразим из (17)  $f_1$  и подставим это значение в (14). В результате получается зависимость напора от насоса  $H_{нас}$  от скорости вращения

$$H_{нас} = \frac{900k_{нф}}{(\pi k_n)^2} \omega^2 = \frac{900 \cdot 0,256}{(\pi \cdot 58,2)^2} \omega^2 = 0,00689 \omega^2,$$

которая полностью совпадает с формулой (12).

Определим также из графиков, приведенных на рисунке 9 зависимость подачи насоса  $Q_{нас}$  частоты  $f_1$  при  $H_{нас} = 0$  (таблица 2).

Таблица 2 – Зависимость подачи насоса  $Q_{нас}$  в функции частоты  $f_1$

$Q_{нас}, \text{ м}^3/\text{сут.}$	180	203	225	248	270	292	315
$f_1, \text{ Гц}$	40	45	50	55	60	65	70

Анализ данных таблицы 2 позволяет сделать вывод, что

$$Q_{нас} = k_{Qf} f_1, \quad (18)$$

где  $k_{Qf} = 4,5$  м<sup>3</sup>/Гц·сут.

С учетом формулы (17) выражение (18) можно записать следующим образом

$$Q_{нас} = \frac{30k_{Qf}}{\pi k_n} \omega = \frac{30 \cdot 4,5}{\pi \cdot 58,2} \omega = 0,738 \omega.$$

Следовательно, формула (13) справедлива, причем для рассматриваемого центробежного насоса 0215ЭЦНАКИ5-125  $k_Q = 0,738$  м<sup>3</sup>с/рад·сут.

Мощность на входном валу центробежного насоса и, следовательно, на валу погружного двигателя определяется формулой

$$P_{нас} = P_{ПЭД} = \frac{\rho g H_{нас} Q_{нас}}{86400 \eta_{нас}} + M_{0ПЭД} \omega, \quad (19)$$

где  $\rho$  – плотность, добываемой из скважины жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\eta_{нас}$  – коэффициент полезного действия насоса, зависящий от расположения рабочей точки на напорной характеристике;  $M_{0ПЭД}$  – момент, необходимый для проворачивания вала двигателя совместно с насосом на холостом ходу (момент трогания).

Подставляя (12) и (13) в (19) получим зависимость полезной мощности на валу ПЭД от скорости вращения

$$P_{ПЭД} = \frac{\rho g k_H k_Q \omega^3}{86400 \eta_{нас}} + M_{0ПЭД} \omega. \quad (20)$$

Момент сопротивления на валу ПЭД при работе с погружным центробежным насосом равен

$$M_c = \frac{P_{ПЭД}}{\omega} + M_{0ПЭД}, \quad (21)$$

Подставляя (20) в (21), получим

$$M_c = k_M \omega^2 + M_{0ПЭД}, \quad (22)$$

где  $k_M = \frac{\rho g k_H k_Q}{86400 \eta_{нас}}$ .

## **2.2 Влияние особенностей преобразователей частоты на потребление электрической энергии при добыче нефти и обоснование целесообразности их применения в станциях управления погружными центробежными насосами**

Полученные выше формулы позволяют провести обоснование целесообразности применения частотных преобразователей в станциях управления

погружными центробежными насосами с позиции повышения энергетической эффективности механизированной добычи нефти.

Действительно, частотные преобразователи находят широкое применение в станциях управления погружными центробежными насосами. При этом они выполняют целый ряд важных задач: плавный пуск погружного электродвигателя, вывод нефтяной скважины на стационарный режим работы по требуемому закону, стабилизацию динамического уровня жидкости в скважине [67-71].

Следует отметить, что плавный пуск ПЭД позволяет увеличить межремонтный период скважины за счет снижения пусковых токов и ограничения момента нагрузки на входном валу центробежного насоса. Организация требуемого закона изменения динамического уровня жидкости в скважине обеспечивает вывод нефтяной скважины на установившийся режим работы без перегрева ПЭД. Стабилизация динамического уровня жидкости позволяет эксплуатировать скважину в длительном режиме со строго заданным дебитом.

Все эти аспекты очень важны с технологической точки зрения добычи нефти и обеспечивают большой экономический эффект. Однако, применение частотного преобразователя в станции управления погружным центробежным насосом может привести к увеличению удельных затрат электроэнергии. Действительно, частотный преобразователь обладает собственным коэффициентом полезного действия и коэффициентом мощности, что приводит к дополнительным затратам электроэнергии по сравнению с вариантом использования станции управления без частотного преобразователя. Кроме того, выходное напряжение инвертора содержит высшие гармоники, которые приводят к дополнительным потерям в повышающем трансформаторе и погружном электродвигателе [72].

С другой стороны, для обеспечения требуемого дебита скважины, оснащенной погружным насосом со станцией управления без частотного преобразователя, может применяться дросселирование штуцера, установленного

на устье. В этом случае на штуцере будут происходить гидравлические потери, которые вызывают дополнительные затраты электрической энергии. Частотный преобразователь позволяет регулировать скорость вращения погружного электродвигателя и обеспечивать требуемый дебит скважины при полностью открытом штуцере.

В связи с этим появляется задача определения условий, при которых применение частотного преобразователя в станции управления приводит к снижению затрат электрической энергии и становится эффективным с энергетической точки зрения.

Для определения потерь в элементах электротехнического комплекса добывающей скважины, прежде всего, необходимо знать величину активной мощности, которую требуется подвести к входному валу центробежного насоса от ПЭД. Она будет определяться выражением (20) [4, 73].

Однако, следует учитывать, что напорная характеристика центробежного насоса описывается уравнением [4, 61]

$$H_{нас} = aQ_{нас}^2 + b\omega Q_{нас} + c\omega^2, \quad (23)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – определяются по трем характерным точкам напорной характеристики насоса, приведенной в каталоге и пересчитанной на откачку нефтяной смеси с учетом коэффициентов  $K_{Qv}$ ,  $K_{Q\beta}$ ,  $K_{Hv}$  и  $K_{H\beta}$ , характеризующих снижение производительности и напора из-за влияния вязкости жидкости и газового фактора.

Рассмотрим первый режим работы насоса, когда для обеспечения требуемого дебита скважины применяется дросселирование штуцера.

Подставляя (23) в (20) получим формулу, связывающую мощность  $P_{нас1}$  подводимую к валу насоса в этом режиме, с подачей  $Q_{нас}$  и скоростью  $\omega_1$

$$P_{нас1} = \frac{(aQ_{нас}^3 + bQ_{нас}^2\omega_1 + cQ_{нас}\omega_1^2)\rho g}{86400\eta_{нас1}} + M_{0ПЭД}\omega_1, \quad (24)$$

где  $\eta_{нас1}$  – КПД насоса, соответствующий рабочей точке.

В случае, когда в станции управления погружным насосом не используется частотный преобразователь, рабочая точка насоса с требуемой производительностью  $Q_{нас}$  устанавливается именно дросселированием штуцера. При этом нагрузка погружного асинхронного двигателя (момент) изменяется, что приводит и к вариации скорости  $\omega_1$ . Для ее определения предположим, что на рабочем участке механическая характеристика асинхронного двигателя близка к линейной. Тогда можно записать следующее равенство [5]

$$\frac{\omega_{0\_50} - \omega_1}{M_1} = \frac{\omega_{0\_50} - \omega_{ном}}{M_{ном}}, \quad (25)$$

где  $\omega_{ном}$  и  $M_{ном}$  – номинальные значения скорости и момента ПЭД;  $\omega_{0\_50}$  – скорость идеального холостого хода двигателя при частоте питающего напряжения 50 Гц;  $M_1$  – фактическая величина момента на валу ПЭД, которую можно определить по формуле

$$M_1 = \frac{P_{нас1}}{\omega_1}. \quad (26)$$

Подставляя (24) в (26) и затем в (25), получим квадратное уравнение относительно скорости вращения ПЭД и центробежного насоса  $\omega_1$

$$\begin{aligned} & \left[ 86400\eta_{нас1}M_{ном} + cQ_{нас}\rho g (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) \right] \omega_1^2 - \\ & - \left[ 86400\eta_{нас} \omega_{0\_50} M_{ном} - (86400\eta_{нас1}M_{0ПЭД} + bQ_{нас}^2\rho g) (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) \right] \omega_1 + \\ & + 4aQ_{нас}^3\rho g (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

Исходя из реального физического смысла из (27) следует формула для определения скорости  $\omega_1$

$$\begin{aligned} & \left[ 86400\eta_{нас1}\omega_{0\_50}M_{ном} - (86400\eta_{нас1}M_{0ПЭД} + bQ_{нас}^2\rho g) (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) \right] + \\ & + \sqrt{\left[ 86400\eta_{нас} \omega_{0\_50} M_{ном} - (86400\eta_{нас1}M_{0ПЭД} + bQ_{нас}^2\rho g) (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) \right]^2 - \\ & - 4aQ_{нас}^3\rho g (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) \left[ 86400\eta_{нас1}M_{ном} + cQ_{нас}\rho g (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) \right]} \\ \omega_1 = & \frac{\quad}{2 \left[ 86400\eta_{нас1}M_{ном} + cQ_{нас}\rho g (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) \right]}. \end{aligned} \quad (28)$$

Подстановка (28) в (23) и (24) позволяет найти фактический напор  $H_{нас1}$ , развиваемый насосом и потребляемую им мощность  $P_{нас1}$ . При этом активная мощность, подводимая к статорной обмотке ПЭД, будет равна

$$P_{ПЭД1} = \frac{P_{нас1}}{\eta_{ПЭД}}, \quad (29)$$

где  $\eta_{ПЭД}$  – КПД погружного электродвигателя.

Реактивная мощность, потребляемая ПЭД, будет определяться формулой [4, 6]

$$Q_{ПЭД1} = 3U_{11}^2 \left( \frac{s_1^2 X_\kappa}{R_{2\Gamma}^2 + s_1^2 X_\kappa^2} + \frac{U_{11}^v}{X_m} \right), \quad (30)$$

где  $U_{11}$  – фазное напряжение статора ПЭД в рассматриваемом случае;

$s_1 = \frac{\omega_{0\_50} - \omega_1}{\omega_{0\_50}}$  – фактическое скольжение ротора двигателя;  $R_{2\Gamma}$ ,  $X_\kappa$  и  $X_m$  –

параметры Г-образной схемы замещения ПЭД;  $v$  – коэффициент, учитывающий нелинейность характеристики намагничивания.

Если непосредственно к обмотке статора ПЭД подключена трехфазная конденсаторная батарея, то она компенсирует потребляемую реактивную мощность на величину

$$Q_{ку1} = \frac{3U_{11}^2}{X_{ку}},$$

где  $X_{ку}$  – реактивное сопротивление конденсаторной установки при частоте питающего напряжения 50 Гц.

Суммарная реактивная мощность, потребляемая ПЭД с учетом индивидуальной конденсаторной батареи [4]

$$Q_{ПЭД1} = 3U_{11}^2 \left[ \frac{s_1^2 X_\kappa}{R_{2\Gamma}^2 + s_1^2 X_\kappa^2} + \frac{U_{11}^v}{X_m} - \frac{1}{X_{ку}} \right]. \quad (31)$$

Формула (31) является более общей, но в случае, когда конденсаторная батарея отсутствует, в ней принимается  $X_{ку1} = \infty$ .

Рассчитав по формулам (29) и (31) активную и реактивную мощность, потребляемую ПЭД, можно определить потери активной и реактивной мощности на кабеле, соединяющем электродвигатель с повышающим трансформатором [6]

$$\Delta P_{кл1} = \frac{(P_{ПЭД1}^2 + Q_{ПЭД1}^2) R_{кл}}{U_{11}^2}; \quad (32)$$

$$\Delta Q_{кл1} = \frac{(P_{ПЭД1}^2 + Q_{ПЭД1}^2) X_{кл}}{U_{11}^2}, \quad (33)$$

где  $R_{кл}$  и  $X_{кл}$  – активное и индуктивное сопротивления одной жилы соединительного кабеля.

Активное сопротивление жилы соединительного кабеля определяется по формуле [55]

$$R_{кл} = \frac{0,0175 \cdot [1 + 0,004 \cdot (T_{кл} - 20)] (H_{сн} + 50)}{S_{кл}}, \quad (34)$$

где  $T_{кл}$  и  $S_{кл}$  – средняя температура и сечение соединительного кабеля;  $H_{сн}$  – глубина спуска погружной установки, а индуктивное сопротивление находится из справочных данных [74].

Активная, реактивная и полная нагрузка на выходе повышающего трансформатора, определяется формулами:

$$P_{ТМПН1} = P_{ПЭД1} + \Delta P_{кл1}; \quad (35)$$

$$Q_{ТМПН1} = Q_{ПЭД1} + \Delta Q_{кл1}; \quad (36)$$

$$S_{ТМПН1} = \sqrt{P_{ТМПН1}^2 + Q_{ТМПН1}^2}. \quad (37)$$

Значение, полученное с помощью формулы (37), позволяет рассчитать коэффициент загрузки повышающего трансформатора

$$\beta_{ТМПН1} = \frac{S_{ТМПН1}}{10^3 S_{ТМПН.ном}}, \quad (38)$$

где  $S_{ТМПН.ном}$  – номинальная мощность повышающего трансформатора, выраженная в кВА.

Активные потери в повышающем трансформаторе определяются по формуле [4, 73]:

$$\Delta P_{ТМПН1} = 10^3 \left( \Delta P_{xx.ТМПН} + \beta_{ТМПН1}^2 \Delta P_{кз.ТМПН} \right); \quad (39)$$

где  $\Delta P_{xx.ТМПН}$  и  $\Delta P_{кз.ТМПН}$  – активные потери холостого хода и короткого замыкания повышающего трансформатора, берущиеся из его паспортных данных.

Активная мощность, снимаемая с выхода станции управления в этом случае, будет равна

$$P_{cy1} = P_{ТМПН1} + \Delta P_{ТМПН1}. \quad (40)$$

Формулы (23) – (40) являются основой для расчета потребления электрической энергии электротехническим комплексом нефтедобывающей скважины для случая, когда станция управления погружным насосом не оснащена частотным преобразователем, а требуемый дебит скважины  $Q_{нас}$  обеспечивается дросселированием штуцера. Количество потребляемой станцией управления активной составляющей электрической энергии в сутки при этом будет равно

$$W_{aэ1} = \frac{24}{10^3} P_{cy1}, \quad (41)$$

а удельные затраты энергии на добычу кубометра жидкости из скважины составят

$$E_{aэ1} = \frac{24 P_{cy1}}{10^3 Q_{нас}}. \quad (42)$$

В случае применения в станции управления погружным насосом преобразователя частоты скорость ПЭД  $\omega_2$  должна быть такой, чтобы насос обеспечивал не только требуемую производительность  $Q_{нас}$ , но и развивал напор [76]

$$H_{нас} = H_{дин} + H_{тр} + \frac{P_{буф}}{\rho g} - H_e, \quad (43)$$

где  $H_{дин}$  – динамический уровень жидкости в скважине;  $H_{тр}$  – гидравлические потери напора в насосно-компрессорных трубах;  $P_{буф}$  – буферное давление на устье скважины;  $H_z$  – дополнительный напор, создаваемый давлением растворенного в добываемой жидкости газа.

Подставляя (43) в (23), получим квадратное уравнение относительно скорости  $\omega_2$

$$H_{дин} + H_{тр} + \frac{P_{буф}}{\rho g} - H_z = aQ_{нас}^2 + bQ_{нас}\omega_2 + c\omega_2^2. \quad (44)$$

Анализ корней уравнения (44) позволяет сказать, что скорость ПЭД для обеспечения требуемой подачи насоса  $Q_{нас}$  в случае использования преобразователя частоты и работе на полностью открытый штуцер должна быть равна

$$\omega_2 = \frac{-bQ_{нас} + \sqrt{b^2Q_{нас}^2 + 4c \left( H_{дин} + H_{тр} + \frac{P_{буф}}{\rho g} - H_z - aQ_{нас}^2 \right)}}{2c}. \quad (45)$$

Эта скорость может быть достигнута, если частотный преобразователь сформирует на своем выходе трехфазную систему напряжений частотой

$$f_1 = \frac{Z_n (\omega_{0.50} - \omega_{ном}) \left[ (aQ_{нас}^3 + bQ_{нас}^2 \omega_2 + cQ_{нас} \omega_2^2) \rho g + 86400 \eta_{нас2} M_{0ПЭД} \omega_2 \right]}{172800 \pi \eta_{нас2} M_{ном} \omega_2} + \frac{Z_n \omega_2}{2\pi}, \quad (46)$$

где  $Z_n$  – число пар полюсов ПЭД;  $\eta_{нас2}$  – КПД центробежного насоса, соответствующий новой рабочей точке.

Формула (46) получена в предположении, что жесткость механической характеристики асинхронного двигателя остается постоянной на любой частоте питающего напряжения, то есть справедливо соотношение

$$\frac{\frac{2\pi f_1}{Z_n} - \omega_2}{M_2} = \frac{\omega_{0\_50} - \omega_{ном}}{M_{ном}}, \quad (47)$$

где  $M_2$  – фактическая величина момента на валу ПЭД при работе в этом режиме.

Поскольку мощность, которую надо передать на входной вал насоса при скорости  $\omega_2$ , определяется формулой, аналогичной (24)

$$P_{нас2} = \frac{(aQ_{нас}^3 + bQ_{нас}^2 \omega_2 + cQ_{нас} \omega_2^2) \rho g}{86400 \eta_{нас2}} + M_{0ПЭД} \omega_2,$$

то момент  $M_2$  будет равен

$$M_2 = \frac{(aQ_{нас}^3 + bQ_{нас}^2 \omega_2 + cQ_{нас} \omega_2^2) \rho g + 86400 \eta_{нас2} M_{0ПЭД} \omega_2}{86400 \eta_{нас2} \omega_2}, \quad (48)$$

После подстановки (48) в (47) и несложных математических преобразований и получается формула (46).

Тогда активная мощность, потребляемая ПЭД при работе со скоростью  $\omega_2$ , будет равна

$$P_{ПЭД2} = \frac{(aQ_{нас}^3 + bQ_{нас}^2 \omega_2 + cQ_{нас} \omega_2^2) \rho g + 86400 \eta_{нас2} M_{0ПЭД} \omega_2}{86400 \eta_{нас2} \eta_{ПЭД} k_{\etaПЭД}}, \quad (49)$$

$k_{\etaПЭД}$  – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в погружном электродвигателе за счет действия высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя.

В большинстве случаев преобразователь частоты станции управления задает частоту напряжения на статорных обмотках ПЭД меньше номинальной, и реактивную мощность, потребляемую ПЭД при управлении от частотного преобразователя, можно рассчитать по формуле

$$Q_{ПЭД2} = 3U_{12}^2 \left[ \frac{s_2^2 X_k \frac{f_1}{50}}{R_{2Г}^2 + s_2^2 \left( X_k \frac{f_1}{50} \right)^2} + \frac{1}{X_m \frac{f_1}{50}} - \frac{1}{X_{кy} \frac{f_1}{50}} \right], \quad (50)$$

где  $U_{12}$  – действующее значение фазного напряжения на статоре ПЭД в случае управления от частотного преобразователя;  $s_2 = \frac{2\pi f_1 - Z_n \omega_2}{2\pi f_1}$ .

Потери активной и реактивной мощности на кабеле, соединяющем электродвигатель с повышающим трансформатором, определяются по формулам, аналогичным (32) и (33)

$$\Delta P_{кл2} = \frac{(P_{ПЭД2}^2 + Q_{ПЭД2}^2) R_{кл}}{U_{12}^2}; \quad (51)$$

$$\Delta Q_{кл2} = \frac{(P_{ПЭД2}^2 + Q_{ПЭД2}^2) X_{кл}}{U_{12}^2}, \quad (52)$$

где индуктивное сопротивление  $X_{кл}$  пересчитывается на частоту напряжения  $f_1$ .

Следовательно, активная, реактивная и полная нагрузка на выходе повышающего трансформатора при использовании частотного преобразователя в станции управления равны

$$P_{ТМПН2} = P_{ПЭД2} + \Delta P_{кл2}; \quad (53)$$

$$Q_{ТМПН2} = Q_{ПЭД2} + \Delta Q_{кл2}; \quad (54)$$

$$S_{ТМПН2} = \sqrt{P_{ТМПН2}^2 + Q_{ТМПН2}^2}, \quad (55)$$

а уточненное выражение для расчета активных потерь повышающего трансформатора будет выглядеть следующим образом

$$\Delta P_{ТМПН2} = 10^3 \left( \Delta P_{xx.ТМПН} + \beta_{ТМПН2}^2 \Delta P_{кз.ТМПН} \right) k_{\Delta P}, \quad (56)$$

где  $\beta_{ТМПН2} = \frac{S_{ТМПН2}}{10^3 S_{ТМПН.ном}}$ ;  $k_{\Delta P}$  – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в повышающем трансформаторе за счет действия высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя [77].

Частотный преобразователь обладает собственным КПД  $\eta_{пч}$ , поэтому активную мощность, потребляемую станцией управления погружным насосом можно рассчитать по формуле [77]

$$P_{cy2} = \frac{P_{ТМПН2} + \Delta P_{ТМПН2}}{\eta_{нч}}. \quad (57)$$

Количество потребляемой станцией управления, оснащенной частотным преобразователем, активной составляющей электрической энергии в сутки при этом будет равно

$$W_{аз2} = \frac{24}{10^3} P_{cy2}, \quad (58)$$

а удельные затраты энергии на добычу кубометра жидкости из скважины составят

$$E_{аз2} = \frac{24 P_{cy2}}{10^3 Q_{нас}}. \quad (59)$$

Приравнявая  $P_{cy2}$  к  $P_{cy1}$ , то есть формулы (57) и (40), получим условие, при котором удельные затраты электроэнергии на добычу кубометра жидкости будут равны как в случае использования частотного преобразователя в станции управления, так и без него

$$\frac{P_{ТМПН2} + \Delta P_{ТМПН2}}{\eta_{нч}} = P_{ТМПН1} + \Delta P_{ТМПН1}. \quad (60)$$

Подставляя в (60) последовательно формулы (24), (28), (29), (32), (34) – (40) и (45), (49), (51) – (57), можно найти уравнение для определения граничного значения производительности и, следовательно, дебита скважины, при котором экономии электрической энергии не будет наблюдаться при использовании частотного преобразователя в станции управления погружным насосом [76]. Оно будет включать в себя сложную зависимость мощности, потребляемой станцией управления с частотным преобразователем, от производительности насоса  $P_{cy2}(Q_{нас})$

$$P_{cy2}(Q_{нас}) = P_{ТМПН1} + \Delta P_{ТМПН1}. \quad (61)$$

Следует отметить, что решение (61) имеет смысл производить численными методами, например, в программе MathCAD, варьируя величину  $Q_{нас}$  от номинальной величины вниз с определенным шагом.

### 2.3 Пример расчета целесообразности применения преобразователя частоты в станции управления погружным электроцентробежным насосом

Рассмотрим гипотетическую скважину, которая обладает следующими техническими характеристиками: требуемый дебит скважины  $Q_{mp} = 98 \text{ м}^3/\text{сут.}$ ; коэффициент продуктивности нефтяного пласта  $k_{np} = 9,118 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Па} \cdot \text{сут.}$ ;  $P_{буф} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ; статический уровень жидкости в скважине  $H_{ст} = 180 \text{ м}$ ;  $H_{дин} = 1235 \text{ м}$ ; глубина спуска насоса  $H_{сн} = 1470 \text{ м}$ ;  $\rho = 1041 \text{ кг/м}^3$ . Воспользуемся методикой оптимального выбора оборудования погружного оборудования [4, 78], в соответствии с которой оптимальный напор насоса для рассматриваемой скважины должен быть равен

$$H_{нас}^{opt} = H_{дин} + H_{mp} + \frac{P_{буф}}{\rho g} - H_z = 1235 + 10 + \frac{1500000}{1041 \cdot 9,81} = 1392 \text{ м},$$

а оптимальная производительность (подача)

$$Q_{нас}^{opt} = Q_{mp} = 98 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

При расчетах было принято, что разность между потерями напора на трение в насосно-компрессорных трубах и дополнительным напором, создаваемым работой газа равна

$$H_{mp} - H_z = 10 \text{ м.}$$

Полученные оптимальные значения подачи и напора соответствуют откачке из скважины жидкости определенной вязкости и газосодержания. Эти факторы снижают напор и подачу насоса по сравнению с паспортными данными, которые приводятся в каталогах для работы на воде. Поэтому полученные данные надо пересчитать с учетом коэффициентов  $K_{Qv}$ ,  $K_{Q\beta}$ ,  $K_{Hv}$  и  $K_{H\beta}$ , характеризующих снижение производительности и напора из-за влияния вязкости жидкости и газового фактора. Принимая

$K_{Qv}K_{Qv} = K_{Hv}K_{H\beta} = 0,96$ , найдем оптимальные параметры насоса при работе на воде

$$Q_{нас.в}^{opt} = \frac{Q_{нас}^{opt}}{K_{Qv}K_{Q\beta}} = \frac{98}{0,96} = 102 \text{ м}^3/\text{сут.}, \quad H_{нас.в}^{opt} = \frac{H_{нас}^{opt}}{K_{H\beta}K_{Hv}} = \frac{1392}{0,96} = 1450 \text{ м.}$$

Анализируя данные каталога погружного оборудования ООО «Римера» [57], видно, что для рассматриваемой скважины подходит насос 0215ЭЦНАКИ5-125И с номинальной производительностью на воде  $Q_{нас.в}^{ном} = 125 \text{ м}^3/\text{сут.}$ , напором  $H_{нас.в}^{ном} = 1450 \text{ м вод.}$ , максимальным КПД  $\eta_{нас.в}^{max} = 0,53$  и моментом трогания  $M_{0ПЭД} = 8,2 \text{ Нм.}$  При выборе насоса ориентировались на то, чтобы номинальные параметры были равны или были больше оптимальных расчетных величин. При этом на номинальной скорости вращения с учетом вязкости и газосодержания жидкости будут наблюдаться реальные производительность насоса  $Q_{нас.ном} = 120 \text{ м}^3/\text{сут.}$  и напор  $H_{нас.ном} = 1392 \text{ м.}$  Из напорной характеристики, приведенной в каталоге [61] и на рисунке 8, следуют значения коэффициентов, описывающих ее вид:  $a = -0,062685 \text{ сут.}^2/\text{м}^5$ ;  $b = 0,021534 \text{ сут.с}/\text{м}^2\text{рад}$ ;  $c = 0,01623 \text{ мс}^2/\text{рад}^2$ .

Тем не менее, ориентируясь на агрегат с максимальным КПД, можно определить необходимую минимальную мощность электродвигателя для обеспечения требуемого дебита скважины

$$P_{дв.ном}^{opt} = 10^{-3} \cdot \frac{K_p H_{нас}^{Qmp} Q_{mp} \rho g}{86400 \eta_{нас.в}^{Qmp} K_\eta} = 10^{-3} \cdot \frac{1,15 \cdot 1548 \cdot 98 \cdot 1041 \cdot 9,81}{86400 \cdot 0,5 \cdot 0,93} = 44,3 \text{ кВт},$$

где  $K_\eta = 0,93$  – поправочный коэффициент, учитывающий снижение КПД насоса при работе с жидкостью определенной вязкости и газосодержанием [69, 70];  $K_p = 1,15$  – коэффициент запаса по мощности.

По полученным данным выберем из каталога для установки центробежного насоса погружной асинхронный электродвигатель ЭДТ45-103М1 со следующими номинальными данными: мощность  $P_{SM.ном} = 45 \text{ кВт}$ ; линейное напряжение  $U_{1л.ном} = 1400 \text{ В}$ ; ток  $I_{1.ном} = 28 \text{ А}$ ; коэффициент полезного дейст-

вия  $\eta_{ПЭД} = 81 \%$ ;  $\cos \varphi_{ПЭД} = 0,83$ ; скольжение  $s_{ном} = 0,055$ ; число пар полюсов  $Z_p = 1$ ; скорость идеального холостого хода  $\omega_{0\_50} = 314$  рад/с; номинальная скорость  $\omega_{ном} = 296,9$  рад/с; номинальный момент  $M_{ном} = 151,6$  Нм;  $R_{2Г} = 1,868$  Ом;  $X_k = 6,884$  Ом;  $X_m = 68,414$  Ом;  $k_{\eta_{ПЭД}} = 0,94$ .

При рассматриваемой глубине спуска установки погружного электроцентробежного насоса, сечения кабеля  $S_{кл} = 25$  мм<sup>2</sup> и его средней температуре  $T_{кл} = 50$  градусов активное сопротивление, рассчитанное по формуле (34) будет равно  $R_{кл} = 1,199$  Ом, а индуктивное сопротивление на номинальной частоте составит  $X_{кл} = 0,126$  Ом.

Для согласования напряжения ПЭД с напряжением станции управления установлен повышающий трансформатор ТМПНГ100/3 номинальной мощностью 100 кВА, который характеризуется следующими потерями: холостого хода  $\Delta P_{хх.ТМПН} = 0,31$  кВт, короткого замыкания  $\Delta P_{кз.ТМПН} = 2,4$  кВт [57]. При этом для учета дополнительных потерь от действия высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя примем  $k_{\Delta P} = 1,05$ . Также следует отметить, что в рассматриваемом варианте комплектации погружного оборудования индивидуальная конденсаторная батарея для компенсации реактивной мощности ПЭД не применяется, а КПД частотного преобразователя (в случае его установки в станцию управления) равно  $\eta_{ПЧ} = 0,96$ .

Подставляя эти данные в формулы (24) – (60), набранные в программе MathCAD, и варьируя производительность насоса  $Q_{нас}$  от 120 м<sup>3</sup>/сут. вниз с переменным шагом, найдем граничное значение производительности  $Q_{нас.гр}$ , при котором потребляемая активная мощность электротехническим комплексом нефтяной скважины, как в случае применения частотного преобразователя, так и без него будет одной и той же. Проведенные расчеты показывают, что для рассматриваемой скважины  $Q_{нас.гр} = 98,91$  м<sup>3</sup>/сут., при этом в обоих случаях потребляется станцией управления погружным насосом активная

мощность 52,7 кВт. Таким образом, следует ожидать, что при требуемом дебите  $Q_{mp} = 98 \text{ м}^3/\text{сут.}$  применение частотного преобразователя приведет к экономии электрической энергии. Действительно, расчет показывает, что при  $Q_{нас} = 98 \text{ м}^3/\text{сут.}$  потребляемая станцией управления активная мощность в случае дросселирования штуцера равна 52,12 кВт, а в случае применения частотного преобразователя – 51,57 кВт. То есть можно сказать, что применение частотного преобразователя в станции управления погружным насосом рассматриваемой гипотетической скважины приведет к снижению потребляемой активной мощности на 0,54 кВт. В результате суточное потребление электрической энергии снизится на 13,1 кВт·час.

Если же в процессе подбора погружного оборудования не использовалась методика энергоэффективного дизайна и погружной насос совместно с электродвигателем были выбраны с большим запасом, энергетическая эффективность применения частотного преобразователя еще более возрастет. Действительно, если для рассматриваемой скважины и выбранной установки центробежного насоса необходимо обеспечить дебит в  $90 \text{ м}^3/\text{сут.}$ , то потребляемая станцией управления активная мощность при дросселировании штуцера будет равна 51,41 кВт, а в случае применения частотного преобразователя – 44,89 кВт. Следовательно, будет наблюдаться экономия потребляемой электроэнергии в 156,4 кВт·час в сутки, что приведет к снижению удельных затрат при механизированной добыче нефти на  $E_{a\omega 1} - E_{a\omega 2} = 1,738 \text{ кВт·час / м}^3$ .

Однако следует отметить, что экономия электрической энергии является не основной задачей частотных преобразователей, применяемых в станциях управления погружными насосами. Частотные преобразователи за счет своих функциональных возможностей позволяют увеличить межремонтный период скважины как минимум в 2 раза [79], что приводит к значительному экономическому эффекту.

## 2.4 Напорные характеристики штанговых скважинных насосных установок и их влияние на потребление мощности приводными двигателями

Штанговые скважинные насосные установки, также как, и погружные центробежные насосы, предназначены для подъема пластовой жидкости из скважины на поверхность земли. В настоящее время ШСНУ, как правило, применяют на скважинах с дебитом до 30...40 м<sup>3</sup> жидкости в сутки, реже до 50 м<sup>3</sup> при средних глубинах подвески 1000...1500 м. В неглубоких скважинах установка обеспечивает подъем жидкости до 200 м<sup>3</sup>/сут. В отдельных случаях может применяться подвеска насоса на глубину до 3000 м.

Широкое распространение ШСНУ обуславливают следующие факторы:

- простота ее конструкции;
- простота обслуживания и ремонта в промышленных условиях;
- удобство регулировки;
- возможность обслуживания установки работниками низкой квалификации;
- малое влияние на работу ШГНУ физико-химических свойств откачиваемой жидкости;
- высокий КПД;
- возможность эксплуатации скважин малых диаметров.

Установка состоит из привода, устьевого оборудования, насосных штанг, глубинного насоса, вспомогательного подземного оборудования, насосно-компрессорных труб. Привод предназначен для преобразования энергии двигателя в возвратно-поступательное движение колонны насосных штанг.

В большинстве ШСНУ в качестве привода применяют балансирные станки-качалки (рисунок 10).

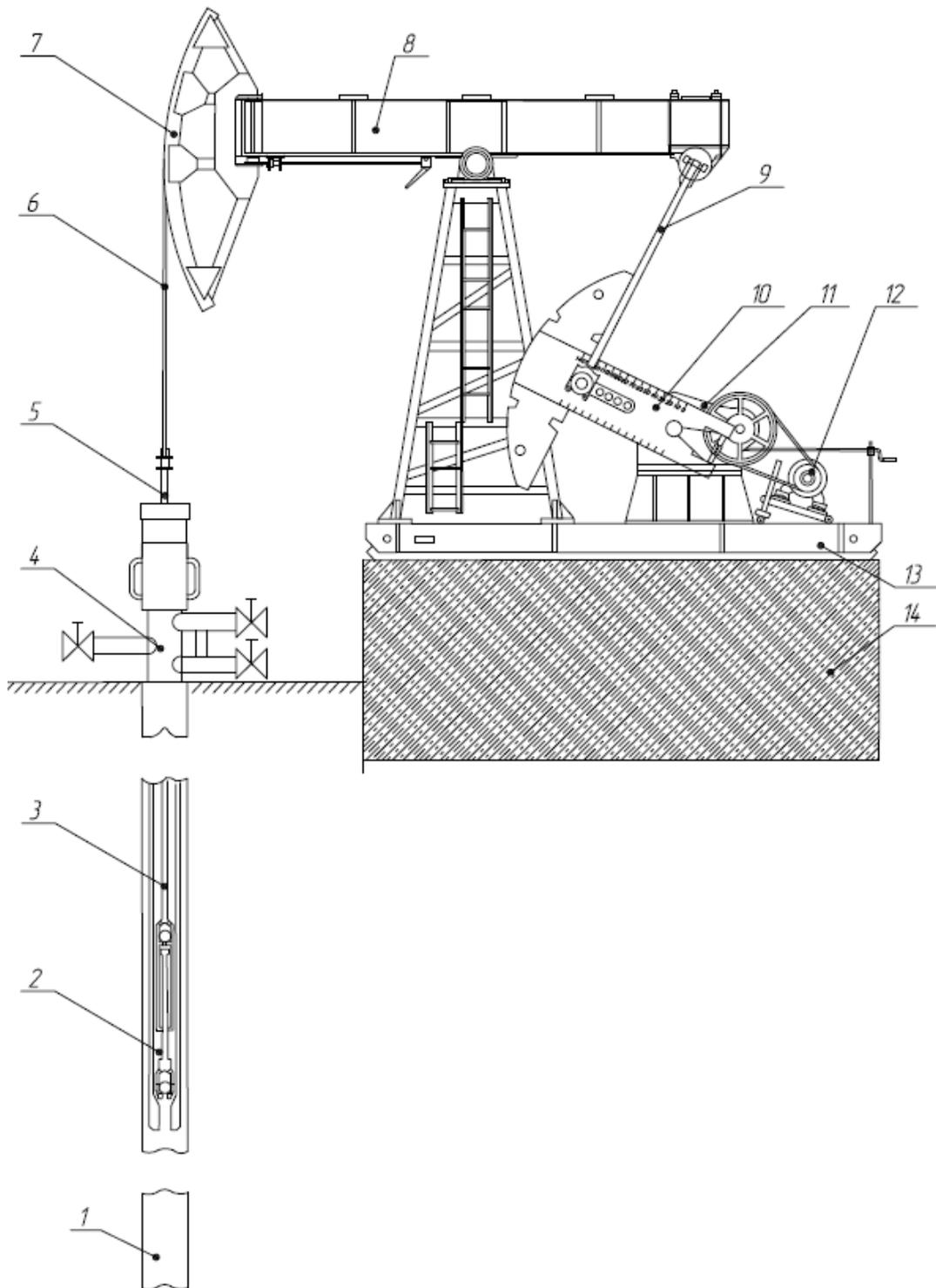


Рисунок 10 – Штанговая скважинная насосная установка с балансирующим станком-качалкой

Балансирный станок-качалка состоит из рамы 13, установленной на массивном фундаменте 14. На раме смонтированы: стойка, на которой с помощью шарнира укреплен балансирующий станок 8, имеющий на одном конце головку 7 на другом – шарнир, соединяющий его с шатуном 9. Шатун соединен с криво-

шипом 10, укрепленном на выходном валу редуктора. Входной вал редуктора 11 посредством клиноременной передачи соединен с электродвигателем 12. Головка балансира 7 соединена со штоком 5 с помощью канатной подвески 6. Устьевая арматура 4 предназначена для герметизации полировочного штока 5, направления потока жидкости потребителю, подвешивания насосно-компрессорных труб, замера затрубного давления, проведения исследовательских работ в скважине и соединения канатной подвески 6 насоса 2 с плунжером глубинного насоса. Колонна собирается из отдельных штанг 3.

ШСНУ вместо балансирных станков-качалок могут также использовать цепные приводы.

Штанговые глубинные насосы, как правило, плунжерные, обладают отличной от центробежной напорной характеристики (рисунок 11) [80].

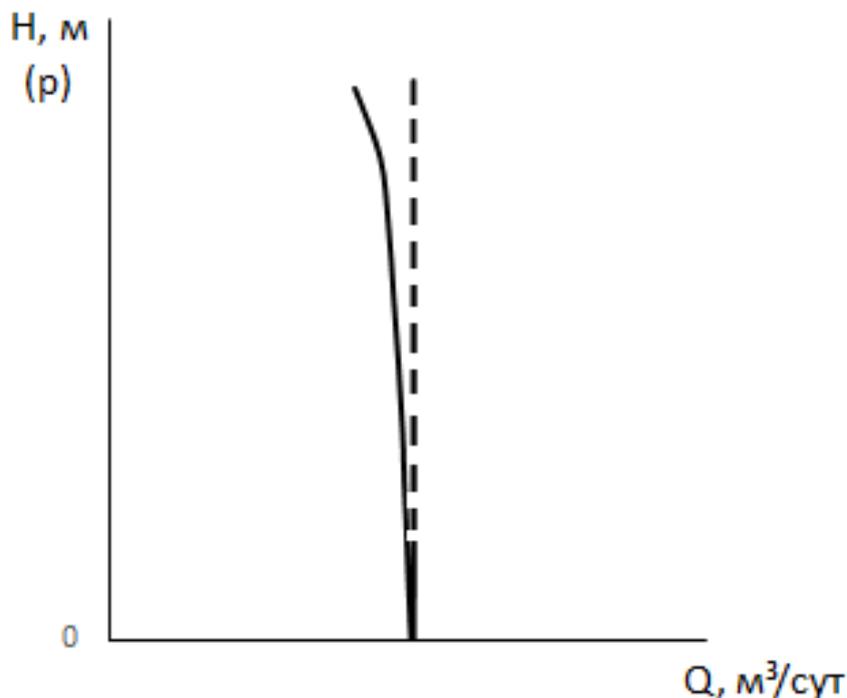


Рисунок 11 – Напорная характеристика плунжерного насоса

Плунжерные насосы относятся к объемным насосам, принцип действия которых основан на вытеснении замкнутых объемов жидкости. В таких насосах зависимость между напором  $H_{нас}$  и производительностью  $Q_{нас}$  представляет собой вертикальную линию, которая показывает, что подача насоса является постоянной величиной, не зависящей от напора. Однако из-за наличия

утечек жидкости через уплотнения, возрастающих с увеличением давления, реальная характеристика отличается от теоретической.

Сила, действующая на редуктор ШСНУ, например, с цепным приводом (рисунок 12) [81] при подъеме жидкости и движении штанги вверх приблизительно можно описать уравнением

$$F_{ред1} = G_{шт} + G_{жс} + \frac{P_{буф}}{\rho g} + k_v V_{шт1} - G_{не}, \quad (62)$$

где  $G_{шт}$  – сила веса штанг;  $G_{жс}$  – сила веса столба жидкости;  $G_{не}$  – сила, создаваемая противовесом;  $k_v$  – коэффициент, связывающий силы вязкого и сухого трения со скоростью перемещения штанг;  $V_{шт1}$  – линейная скорость движения штанги вверх.

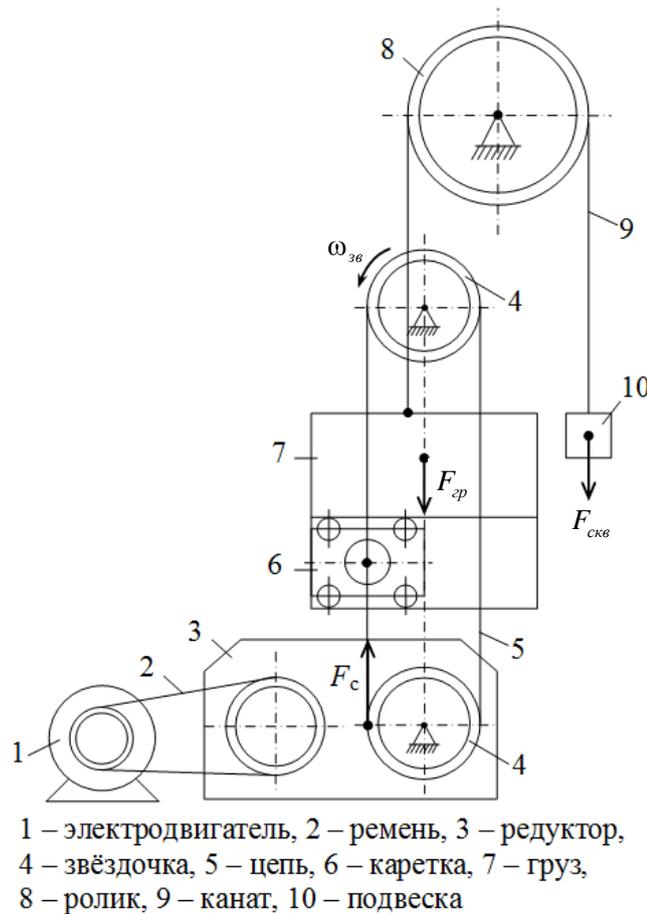


Рисунок 12 – Кинематическая схема ШСНУ с цепным приводом

При движении плунжера насоса вниз, сила, действующая на редуктор будет равна

$$F_{ред2} = G_{нв} - G_{ум} + k_v V_{ум2}, \quad (63)$$

где  $V_{ум2}$  – линейная скорость движения штанги вниз.

Следовательно, на вал асинхронного двигателя, приводящего в движение станок-качалку, действует переменный момент сопротивления, равный, исходя из формул (62) и (63)

$$M_{c1} = \frac{F_{ред1} r_{зв}}{i_{ред} \eta_{ред}} = M_{G1} + k_{M2} \omega_1, \quad (64)$$

и

$$M_{c2} = \frac{F_{ред2} r_{зв}}{i_{ред} \eta_{ред}} = M_{G2} + k_{M2} \omega_2, \quad (65)$$

где  $M_{G1}$  – момент, создаваемый силами веса и буферного давления при движении штанг вверх;  $M_{G2}$  – момент, создаваемый силами веса при движении штанг вниз;  $k_{M2}$  – коэффициент, связывающий дополнительный момент на валу асинхронного двигателя, вызванный силами вязкого и сухого трения, со скоростью вращения  $\omega$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – скорости вращения вала асинхронного двигателя ШСНУ при движении вверх и вниз, соответственно;  $i_{ред}$  – общее передаточное число ременной передачи и редуктора;  $\eta_{ред}$  – общий коэффициент полезного действия ременной передачи и редуктора;  $r_{зв}$  – радиус приложения силы к цепному приводу.

Скорость вращения ротора двигателя при одном и том же значении напряжения статора будет меняться в зависимости от направления движения штанг. Это объясняется тем, что момент нагрузки на валу двигателя будет иметь существенно разную величину при движении штанг вверх и вниз. Следовательно, падение скорости  $\Delta\omega_1$ , также будет менять свое значение. Тем не менее, пользуясь формулой (25) можно найти среднее падение скорости за период качания ШСНУ

$$\Delta\omega_1 = \frac{(\omega_{0.50} - \omega_{ном})(M_{c1} + M_{c2})}{2M_{ном}}. \quad (66)$$

Отсюда следует, что средняя скорость вращения ротора двигателя ШСНУ при номинальном напряжении статора будет равна

$$\omega = \omega_{0\_50} - \frac{(\omega_{0\_50} - \omega_{ном})(M_{c1} + M_{c2})}{2M_{ном}}. \quad (67)$$

Формулами аналогичными (62) – (67) описываются силы, моменты и скорости вращения наземных асинхронных двигателей и ШСНУ в виде традиционных станков-качалок.

Моменты, действующие на вал электродвигателя станка-качалки или ШСНУ с цепным приводом можно определить по динамограмме, фиксируемой датчиком силы. Для примера рассмотрим фактическую динамограмму, полученную со скважины, оборудованной приводом ЦП-60 (рисунок 13) [81].

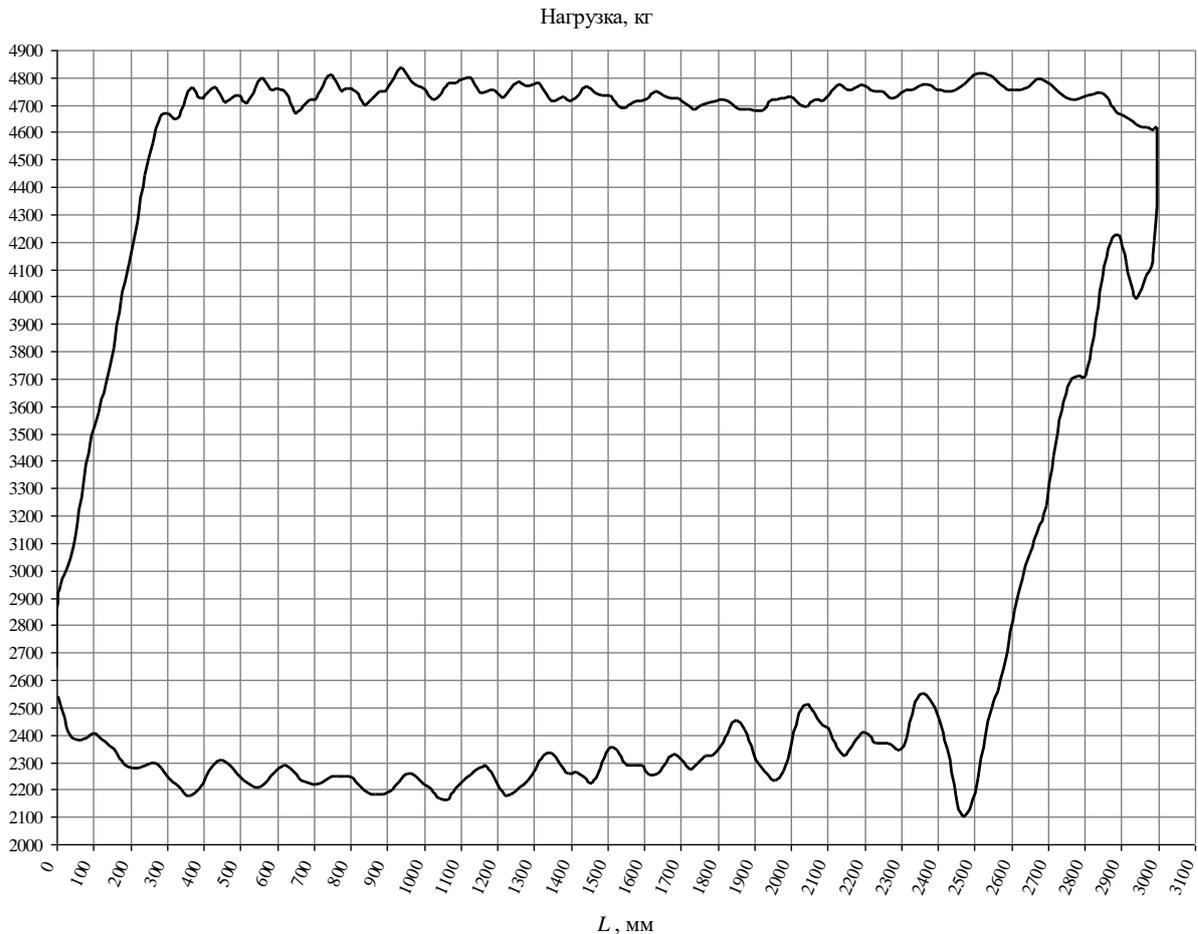


Рисунок 13 – Фактическая динамограмма работы ШСНУ с цепным приводом

Из динамограммы следует, что при подъеме сила  $F_1 = 9,81 \cdot 4750 = 46598$  Н, а при спуске штанг –  $F_2 = 9,81 \cdot 2250 = 22073$  Н.

Установка оснащена плунжерным насосом НСН 2В с диаметром плунжера  $d_{пл} = 0,044$  м. Насос спущен на глубину  $L_{сн} = 875$  м на насосно-компрессорных трубах с диаметром  $d_{нкт} = 0,06$  м, при чем диаметр штанг равен  $d_{шм} = 0,022$  м. Сила, создаваемая противовесом равна  $G_{пв} = 24000$  Н. Из этих данных можно рассчитать, что сила, вызванная весом штанги, будет равна  $G_{шм} = 25451$  Н. При длине хода плунжера  $L_{хода} = 3$  м, периоде цикла качания  $t_{ц} = 41$  с, радиусе  $r_{зв} = 0,112$  м и общем коэффициенте редукции  $i_{ред} = 80$  скорость вращения вала приводного асинхронного двигателя будет равна  $\omega = 104$  рад/с.

При этом следует учесть, что  $G_{шм} - F_2 = k_{M2}\omega$ . Тогда из динамограммы можно определить величину коэффициента  $k_{M2} = 0,0495$  Нмс/рад и величину  $M_{G2} = 8,061$  Нм. Кроме того, надо иметь ввиду, что  $F_1 = G_{шм} + G_{жс} + \frac{P_{буф}}{\rho g} + k_v V_{шм1}$ . Это позволяет определить момент на валу двигателя, вызванный силами веса и давления  $M_{G1} = 39,46$  Нм.

Следовательно, максимальный момент на валу асинхронного электродвигателя, соответствующий подъему жидкости, равен  $M_{c1} = 44,593$  Нм, а минимальный (при спуске штанг) –  $M_{c2} = 13,193$  Нм.

Активная мощность, потребляемая асинхронным двигателем ШСНУ за период качания будет равна

$$P_{АД} = \frac{(M_{c1} + M_{c2})}{2\eta_{АД}} \omega,$$

где  $\eta_{АД}$  – КПД наземного асинхронного двигателя.

Или с учетом формул (64) – (67)

$$P_{AD} = \frac{M_{G1} + M_{G2}}{2\eta_{AD}} \left[ \frac{M_{ном} \omega_{0\_50} - (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) \frac{M_{G1} + M_{G2}}{2}}{M_{ном} + k_{M2} (\omega_{0\_50} - \omega_{ном})} \right] + \frac{k_{M2} \left[ M_{ном} \omega_{0\_50} - (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) \frac{M_{G1} + M_{G2}}{2} \right]^2}{\eta_{AD} \left[ M_{ном} + k_{M2} (\omega_{0\_50} - \omega_{ном}) \right]^2}. \quad (68)$$

Реактивная мощность, потребляемая двигателем ШСНУ, будет определяться формулами, аналогичными (30) или (31)

$$Q_{AD} = 3U_{11}^2 \left( \frac{s_1^2 X_{\kappa}}{R_{2\Gamma}^2 + s_1^2 X_{\kappa}^2} + \frac{U_{11}^v}{X_m} \right), \quad (69)$$

$$Q_{AD} = 3U_{11}^2 \left[ \frac{s_1^2 X_{\kappa}}{R_{2\Gamma}^2 + s_1^2 X_{\kappa}^2} + \frac{U_{11}^v}{X_m} - \frac{1}{X_{\kappa y}} \right]. \quad (70)$$

Активная мощность, потребляемая станцией управления ШСНУ без преобразователя частоты будет равна

$$P_{cy1} = P_{AD}. \quad (71)$$

В случае, когда станция управления ШСНУ оснащена преобразователем частоты, предназначенным для регулирования наполнения плунжерного насоса, потребление активной мощности станции можно посчитать по формуле

$$P_{cy2} = \frac{P_{AD}}{\eta_{nc}}. \quad (72)$$

## **2.5 Влияние величины напряжения на статорных обмотках асинхронных двигателей на потребляемую активную и реактивную мощность электротехническими комплексами добывающих скважин**

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности механизированной добычи нефти посредством регулирования напряжения промышленной подстанции. Однако очевидно, что вариация напряжения промышленной подстанции приведет к изменению напряжения на

входе станций управления погружными насосами и на статорных обмотках двигателей, приводящих в движение насосы. В связи с этим необходимо знать, как влияет изменение напряжения питания ПЭД центробежных насосов и наземных двигателей ШСНУ на потребление активной и реактивной мощности.

Если в качестве привода насосов применяются асинхронные двигатели, то изменение напряжения питания приводит к изменению их механических характеристик (рисунок 14) [5, 82].

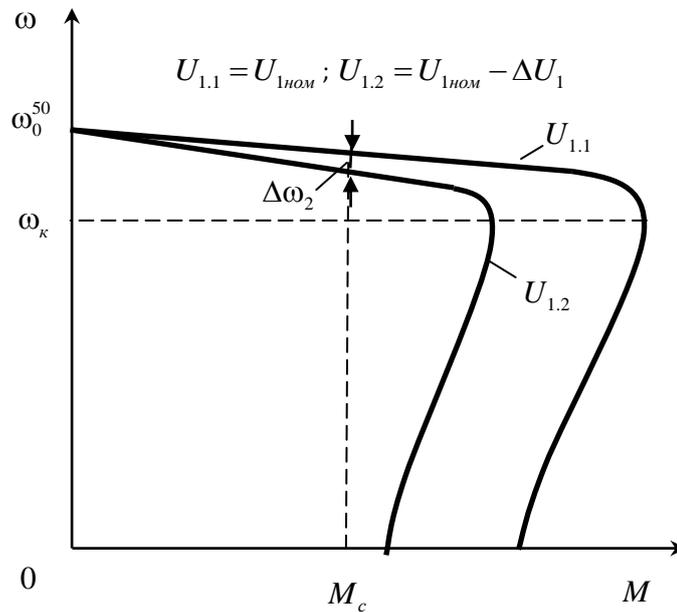


Рисунок 14 – Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения на статоре

Статическое изменение скорости  $\Delta\omega_2$  под действием вариации напряжения статора и момента нагрузки можно вычислить с помощью линеаризованной математической модели асинхронного двигателя [83], в которую входит коэффициент передачи асинхронного двигателя по отношению к  $\Delta U_1$

$$k_{du}^U = \frac{\Delta\omega_2}{\Delta U_1} = \frac{A_{71}A_{65} + A_{62}A_{76}}{A_{71}A_{84} + A_{63}A_{76}}, \quad (73)$$

где  $A_{62} = (1 + B^2 - DF)(AB - C)D + A_{20}A_{30}$

$$\begin{aligned}
A_{63} &= \left[ \psi_{2y0} A_{20} + \psi_{2x0} (1 + B^2 - DF) \right] (1 + B^2) T_2; \\
A_{65} &= A_{30} \left[ (1 + B^2) \psi_{1y0} - BF \psi_{2x0} - F \psi_{2y0} \right] + \\
&+ (1 + B^2 - DF) \left[ (C - AB) \psi_{2x0} - (A + BC) \psi_{2y0} \right]; \\
A_{71} &= (1 + B^2 - DF)^2 + A_{20}^2; \\
A_{76} &= (1 + B^2 - DF) \left[ (1 + B^2) \psi_{1x0} - F \psi_{2x0} + BF \psi_{2y0} \right] - \\
&- A_{20} \left[ (1 + B^2) \psi_{1y0} - BF \psi_{2x0} - F \psi_{2y0} \right]; \\
A_{84} &= (1 + B^2) \psi_{2y0} \left[ (1 + B^2) \psi_{1y0} - F \psi_{2y0} - BF \psi_{2x0} \right] T_2; \\
A = C = T_1; \quad B &= \frac{2\pi T_1 f_{10}}{Z_p}; \quad D = \frac{L_0}{L_1}; \quad F = \frac{L_0}{L_2}; \quad H = \frac{2\pi T_2 f_{10}}{Z_n}; \\
A_{20} &= (H - T_2 \omega_{00}) (1 + B^2) + BDF; \quad A_{30} = D(A + BC).
\end{aligned}$$

Коэффициент (73) определяется для начальных условий, соответствующих номинальной частоте питающего напряжения и номинальному моменту нагрузки двигателя. Тогда, предполагая линейную зависимость падения скорости  $\Delta\omega_2$  от момента нагрузки  $M_c$ , можно рассчитать изменение скорости вращения ротора асинхронного двигателя при вариации напряжения статора по формуле

$$\Delta\omega_2 = \frac{k_{du}^U \Delta U_1 M_c}{M_{ном}}. \quad (74)$$

С учетом (74) и формул (22) и (25) можно получить аналитическое выражение для расчета скорости ПЭД, приводящего в движение погружной центробежный насос, при вариации напряжения статора

$$\omega_{ПЭД} = \frac{\sqrt{M_{ном}^2 + 4k_M \left( \omega_{0\_50} - \omega_{ном} - k_{dy}^U \Delta U_{1ПЭД} \right) \times} \times \left[ M_{ном} \omega_{0\_50} - \left( \omega_{0\_50} - \omega_{ном} - k_{dy}^{U_1} \Delta U_{1ПЭД} \right) M_{0ПЭД} \right] - M_{ном}}{2k_M \left( \omega_{0\_50} - \omega_{ном} - k_{dy}^{U_1} \Delta U_{1ПЭД} \right)}. \quad (75)$$

При этом потребление активной и реактивной мощности погружным электродвигателем, соединительным кабелем, повышающим трансформатором и станцией управления будет определяться формулами (29) – (30).

Если станция управления погружным центробежным насосом оснащена преобразователем частоты, то формула (75) для расчета скорости ПЭД трансформируется в выражение

$$\omega_{ПЭД} = -\frac{M_{ном}}{2k_M d_1} + \sqrt{\frac{M_{ном}^2}{4k_M^2 d_1^2} + \frac{2\pi f_1 M_{ном}}{k_M d_1 Z_p} - \frac{M_{0ПЭД}}{k_M}}, \quad (76)$$

где  $d_1 = \omega_{0\_50} - \omega_{ном} - k_{du}^U \Delta U_1$ , а потребление активной и реактивной мощности погружным электродвигателем, соединительным кабелем, повышающим трансформатором и станцией управления будет определяться формулами (49) – (60).

При этом расчет потребления активной мощности ПЭД можно производить по формуле

$$P_{ПЭД} = \frac{k_M \omega_{ПЭД}^3 + M_{0ПЭД} \omega_{ПЭД}}{k_{\eta ПЭД} \eta_{ПЭД}}. \quad (77)$$

Аналогичным методом, используя формулы (64) – (67) и (74), можно получить зависимость для расчета средней скорости наземного асинхронного двигателя ШСНУ при изменении фазного напряжения статора  $\Delta U_{1АД}$  относительно номинального значения

$$\omega_{АД} = \frac{M_{ном} \omega_{0\_50} - M_{0АД} (\omega_{0\_50} - \omega_{ном} - k_{\omega y}^U \Delta U_{1АД})}{M_{ном} + k_{M2} (\omega_{0\_50} - \omega_{ном} - k_{\omega y}^U \Delta U_{1АД})}, \quad (78)$$

где  $M_{0АД} = \frac{M_{G1} + M_{G2}}{2}$ .

При этом активная мощность, потребляемая асинхронным двигателем ШСНУ, будет определяться формулой

$$P_{АД} = \frac{k_{M2} \omega_{АД}^2 + M_{0АД} \omega_{АД}}{\eta_{АД}}, \quad (79)$$

а реактивная мощность рассчитывается по формуле (69) или (70).

## 2.6 Выводы по второй главе

1. Проведенные исследования позволяют адекватно оценить влияние напорных характеристик погружных центробежных и плунжерных насосов на потребление электрической энергии при добыче нефти.

2. Найдены граничные условия, при которых удельные затраты электроэнергии на добычу кубометра жидкости погружным центробежным насосом будут равны как в случае использования преобразователя частоты, так и без него. Это позволяет обоснованно подходить к выбору комплектации станции управления.

3. Полученная аналитическая зависимость для расчета средней скорости асинхронного двигателя штанговой скважинной насосной установки при вариации напряжения статора учитывает особенности напорной характеристики плунжерного насоса и может быть применена при прогнозировании потребления электрической энергии оборудованием такого типа.

### 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

#### 3.1 Поиск оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию с тремя ПЭД

Для разработки методики расчета и выбора оптимальной величины промышленной подстанции прежде всего необходимо определиться с критерием оптимизации. В качестве целевой функции иногда выбирают минимум потерь в воздушных и кабельных линиях и трансформаторах [57]

$$\sum_{k=1}^m \Delta P_k (U_{ПС}) \rightarrow \min, \quad (80)$$

где  $\Delta P_k$  – потери активной мощности на одном из элементов отходящей от промышленной подстанции линии;  $U_{ПС}$  – напряжение на выходе промышленной подстанции.

Другой возможной целевой функцией может быть стремление достичь минимума потребляемой от промышленной подстанции активной мощности

$$P_{ПС} (U_{ПС}) \rightarrow \min. \quad (81)$$

Также актуальным является стремление достичь минимума удельных затрат активной мощности на добычу кубометра жидкости

$$E_{ав} (U_{ПС}) \rightarrow \min. \quad (82)$$

Можно также поставить задачу поиска напряжения  $U_{ПС}$  промышленной подстанции, доставляющего минимум потребляемой полной мощности

$$S_{ПС} (U_{ПС}) \rightarrow \min \quad (83)$$

или удельных затрат полной мощности

$$E_{пз} (U_{ПС}) \rightarrow \min. \quad (84)$$

Для разработки методики расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции рассмотрим гипотетическую отходящую линию нефтяного промысла, к которой подключены три одинаковых погружных

электродвигателя с центробежными насосами, добывающими нефть из абсолютно одинаковых скважин (рисунок 15).

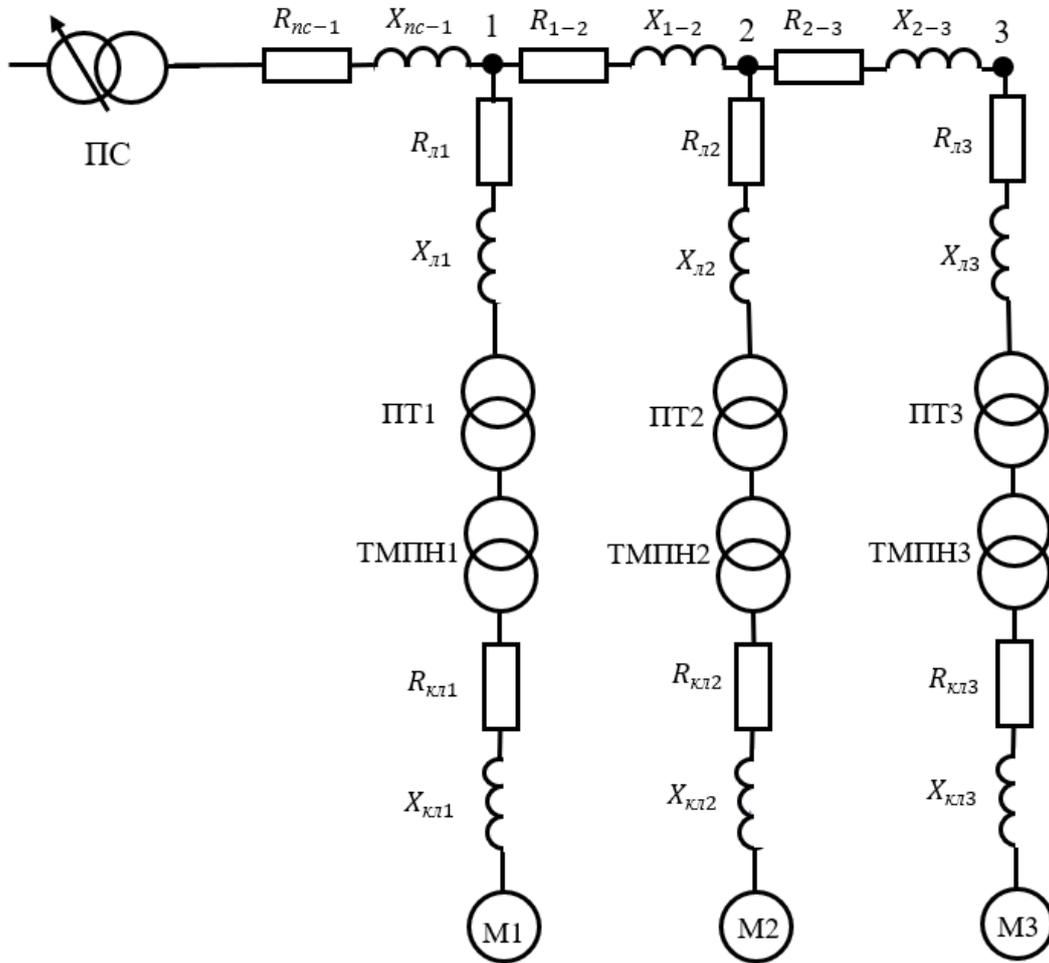


Рисунок 15 – Принципиальная схема гипотетической отходящей линии с тремя ПЭД

Будем считать, что в каждом электротехническом комплексе скважины используются погружные электродвигатели ЭДТ45-103М1, приводящие в движение центробежные насосы 0215ЭЦНАКИ5-125, технические характеристики которых были приведены выше. Каждая скважина характеризуется следующими параметрами:  $H_{нас} = 1620$  м,  $Q_{нас} = 87$  м<sup>3</sup>/сутки,  $\eta_{нас} = 0,47$ ,  $\rho = 1067$  кг/м<sup>3</sup>;  $k_M = 1,328 \cdot 10^{-3}$  Нмс<sup>2</sup>/рад<sup>2</sup>. Для питания ПЭД нестандартным значением напряжения установлены повышающие трансформаторы ТМПН номинальной мощностью 100 кВА, коэффициентом трансформации  $k_{ТМПН} = 0,274$  и следующими параметрами:  $\Delta P_{xx.ТМПН} = 0,31$  кВт;

$\Delta P_{кз.ТМПН} = 2,4$ ;  $U_{к.ТМПН, \%} = 5,5$ ;  $I_{хх.ТМПН, \%} = 2,2$ %. Для сопряжения с воздушной линией электропередач в каждом электротехническом комплексе добывающей скважины применен понижающий трансформатор 6/0,4 кВ с номинальной мощностью 100 кВА, коэффициентом трансформации  $k_{nm} = 15$  и следующими паспортными данными:  $\Delta P_{хх.nm} = 0,29$  кВт;  $\Delta P_{кз.nm} = 1,98$  кВт;  $U_{к.nm, \%} = 4,5$ ;  $I_{хх.nm, \%} = 2,2$ %.

Соединительные кабели, с помощью которых погружные двигатели подключены к повышающим трансформаторам, имеют активное сопротивление  $R_{кл1} = R_{кл2} = R_{кл3} = 1,191$  Ом и реактивное сопротивление  $X_{кл1} = X_{кл2} = X_{кл3} = 0,126$  Ом. Сопротивления воздушных линий, соединяющих понижающие трансформаторы с узлами отходящей линии, имеют следующие значения:  $R_{л1} = R_{л2} = R_{л3} = 0,92$  Ом,  $X_{л1} = X_{л2} = X_{л3} = 0,77$  Ом. Участки отходящей линии между узлами характеризуются сопротивлениями:  $R_{уп-1} = 1,02$  Ом;  $X_{уп-1} = 0,85$  Ом;  $R_{1-2} = 1,224$  Ом;  $X_{1-2} = 1,202$  Ом;  $R_{2-3} = 0,612$  Ом;  $X_{2-3} = 0,51$  Ом.

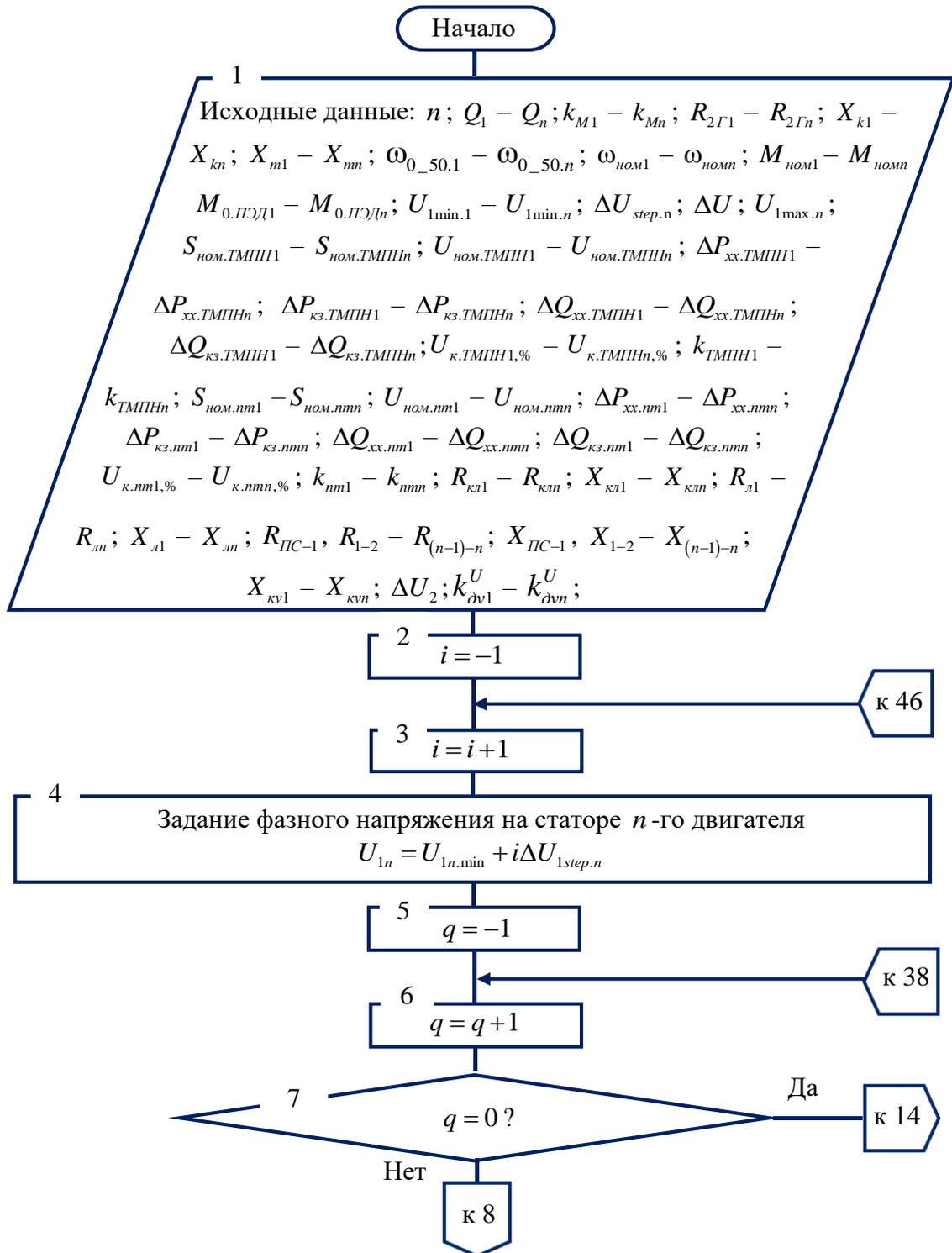
Любой асинхронный двигатель описывается системой пяти нелинейных дифференциальных уравнений, аналитического решения которых принципиально не существует. Поэтому даже для выбора оптимального по какому-либо критерию уровня напряжения питания одного двигателя необходимо пользоваться численными методами расчета [4-6].

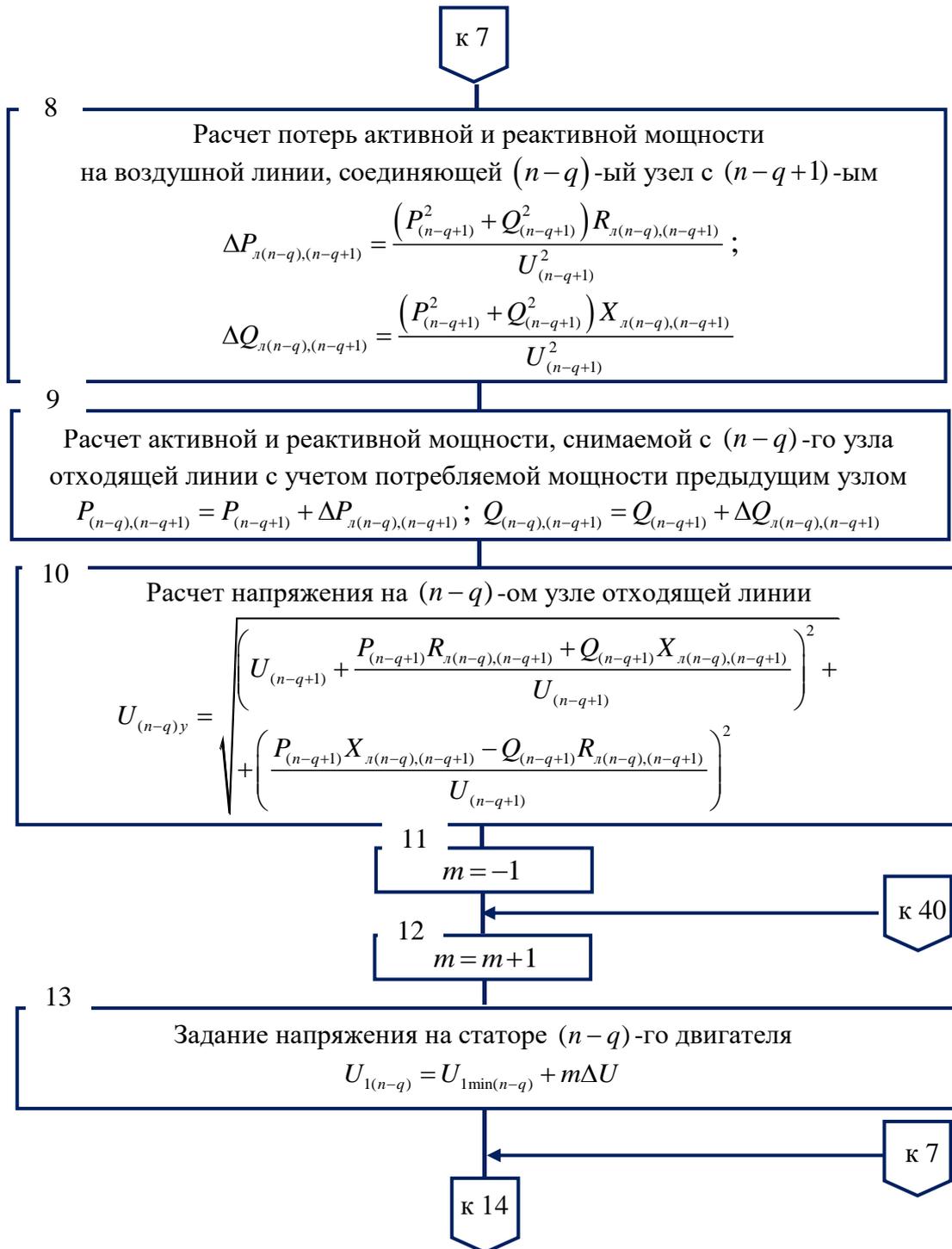
Задача определения оптимальной величины напряжения промышленной подстанции отходящей линии на нефтяном промысле еще более осложняется, поскольку к одной отходящей линии может быть подключено 10 и более скважин, и количество решаемых одновременно уравнений существенно возрастает. Поэтому принципиально поиск оптимальной величины напряжения промышленной подстанции должен производиться численными методами с привлечением того или иного программного продукта, позволяющего использовать поисковые алгоритмы [4-6].

Очевидно, что расчет необходимо вести от самого удаленного электроприемника, то есть от ПЭД, подключенного к 3-му узлу отходящей линии. Предлагается для поиска оптимального значения напряжения промышленной подстанции производить вариацию напряжения на статоре асинхронного двигателя самой удаленной скважины в пределах от  $0,9U_{1ном}$  до  $1,1U_{1ном}$  с некоторым шагом  $\Delta U_{step.n}$ . Тогда методику расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для отходящей линии, содержащей электротехнические комплексы добывающих скважин с погружными центробежными насосами, можно представить в виде алгоритма (рисунок 16).

Исходными данными для расчета являются: количество узлов  $n$ ; производительности  $Q_1 - Q_n$  насосов при номинальной скорости двигателей; коэффициенты  $k_{M1} - k_{Mn}$ ; параметры Г-образной схемы замещения погружных асинхронных двигателей  $R_{2Г1} - R_{2Гn}$ ,  $X_{k1} - X_{kn}$ ,  $X_{m1} - X_{mn}$ ; скорости идеального холостого хода  $\omega_{0.50.1} - \omega_{0.50.n}$  и номинальные скорости вращения двигателей  $\omega_{ном1} - \omega_{номn}$ ; номинальные значения моментов двигателей  $M_{ном1} - M_{номn}$ ; моменты трогания  $M_{0ПЭД.1} - M_{0ПЭД.n}$ ; минимально допустимые значения фазного напряжения двигателей  $U_{1min.1} - U_{1min.n}$ ; шаг приращения напряжения двигателя самого удаленного узла  $\Delta U_{step.n}$ ; шаг приращения напряжения  $\Delta U$  двигателей с 1-го до  $(n-1)$ -го узла; максимально допустимое напряжение на статоре самого удаленного двигателя  $U_{1.max.n}$ ; коэффициенты полезного действия двигателей  $\eta_1 - \eta_n$ ; коэффициенты передачи  $k_{дв1}^U - k_{двn}^U$ ; паспортные данные трансформаторов  $S_{ном.ТМПН1} - S_{ном.ТМПНn}$ ;  $U_{ном.ТМПН1} - U_{ном.ТМПНn}$ ;  $\Delta P_{xx.ТМПН1} - \Delta P_{xx.ТМПНn}$ ;  $\Delta P_{кз.ТМПН1} - \Delta P_{кз.ТМПНn}$ ;  $\Delta Q_{xx.ТМПН1} - \Delta Q_{xx.ТМПНn}$ ;  $\Delta Q_{кз.ТМПН1} - \Delta Q_{кз.ТМПНn}$ ;  $U_{к.ТМПН1,\%} - U_{к.ТМПНn,\%}$ ;  $k_{ТМПН1} - k_{ТМПНn}$ ;  $S_{ном.nm1} - S_{ном.nmn}$ ;  $U_{ном.nm1} - U_{ном.nmn}$ ;  $\Delta P_{xx.nm1} - \Delta P_{xx.nmn}$ ;  $\Delta P_{кз.nm1} - \Delta P_{кз.nmn}$ ;  $\Delta Q_{xx.nm1} - \Delta Q_{xx.nmn}$ ;  $\Delta Q_{кз.nm1} - \Delta Q_{кз.nmn}$ ;  $U_{к.nm1,\%} - U_{к.nmn,\%}$ ;  $k_{nm1} - k_{nmn}$ ; активные и индуктивные сопротивления кабельных линий  $R_{кл1} - R_{кln}$  и  $X_{кл1} - X_{кln}$ ; активные и индуктивные сопротивления воздушных линий  $R_{л1} - R_{лn}$  и  $X_{л1} - X_{лn}$ ; активные и индуктивные сопротивления  $R_{ПС-1}$ ,  $R_{1-2} - R_{(n-1)-n}$ ;

$X_{ПС-1}$ ,  $X_{1-2}$  –  $X_{(n-1)-n}$  между узлами отходящей линии; реактивные сопротивления конденсаторных батарей, подключенных к статорным обмоткам асинхронных двигателей  $X_{кy1} - X_{кyn}$ ; допустимая погрешность напряжения  $\Delta U_2$ .





к 13

14

Расчет скорости вращения вала  $(n - q)$ -го двигателя

$$\omega_{(n-q)} = \frac{\sqrt{M_{ном(n-q)}^2 + 4k_{M(n-q)}d_1(M_{ном(n-q)}\omega_{0\_50(n-q)} - d_1M_{0ПЭД(n-q)})} - M_{ном(n-q)}}{2k_{M(n-q)}d_1},$$

$$\text{где } d_1 = \omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1}(U_{1(n-q),ном} - U_{1(n-q)})$$

15

Расчет активной мощности, потребляемой  $(n - q)$ -ым двигателем

$$P_{ПЭД(n-q)} = \frac{k_{M(n-q)}\omega_{(n-q)}^3 + M_{0ПЭД(n-q)}\omega_{(n-q)}}{\eta_{(n-q)}}$$

16

Расчет скольжения ротора  $(n - q)$ -ого двигателя

$$s_{(n-q)} = \frac{\omega_{0\_50(n-q)} - \omega_{(n-q)}}{\omega_{0\_50(n-q)}}$$

17

Расчет реактивной мощности, потребляемой  $(n - q)$ -ым двигателем

$$Q_{ПЭД(n-q)} = 3U_{1(n-q)}^2 \left[ \frac{s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}}{R_{2Г(n-q)}^2 + s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}^2} + \frac{U_{1(n-q)}^v}{X_{m(n-q)}} - \frac{1}{X_{ky(n-q)}} \right]$$

18

Расчет потерь активной и реактивной мощности на соединительном кабеле  $(n - q)$ -го ПЭД

$$\Delta P_{кл(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2)R_{кл(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}; \quad \Delta Q_{кл(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2)X_{кл(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}$$

19

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на выходе

$$(n - q)\text{-го ТМПН } P_{ТМПН(n-q)} = P_{ПЭД(n-q)} + \Delta P_{кл(n-q)};$$

$$Q_{ТМПН(n-q)} = Q_{ПЭД(n-q)} + \Delta Q_{кл(n-q)}; \quad S_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{P_{ТМПН(n-q)}^2 + Q_{ТМПН(n-q)}^2}$$

к 20

к 19

20

Расчет напряжения на выходе  $(n - q)$ -го ТМПН

$$U_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{\left( \sqrt{3}U_{1(n-q)} + \frac{P_{ПЭД(n-q)}R_{кл(n-q)} + Q_{ПЭД(n-q)}X_{кл(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{ПЭД(n-q)}X_{кл(n-q)} - Q_{ПЭД(n-q)}R_{кл(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2}$$

21

Расчет падения напряжения на соединительном кабеле  
 $(n - q)$ -го ПЭД  $\Delta U_{кл(n-q)} = U_{ТМПН(n-q)} - \sqrt{3}U_{1(n-q)}$ 

22

Расчет коэффициента загрузки  $(n - q)$ -ого ТМПН

$$\beta_{ТМПН(n-q)} = \frac{S_{ТМПН(n-q)}}{10^3 S_{ном.ТМПН(n-q)}}$$

23

Расчет потерь активной, реактивной и полной мощности на  $(n - q)$ -ом ТМПН

$$\Delta P_{ТМПН(n-q)} = 10^3 \left( \Delta P_{xx.ТМПН(n-q)} + \beta_{ТМПН(n-q)}^2 \Delta P_{кз.ТМПН(n-q)} \right);$$

$$\Delta Q_{ТМПН(n-q)} = 10^3 \left( \Delta Q_{xx.ТМПН(n-q)} + \beta_{ТМПН(n-q)}^2 \Delta Q_{кз.ТМПН(n-q)} \right);$$

$$\Delta S_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{ТМПН(n-q)}^2 + \Delta Q_{ТМПН(n-q)}^2}$$

24

Расчет потерь напряжения на  $(n - q)$ -ом ТМПН

$$\Delta U_{ТМПН(n-q)} = \frac{k_{ТМПН(n-q)}^2 \left[ R_{ТМПН(n-q)} P_{ТМПН(n-q)} + X_{ТМПН(n-q)} Q_{ТМПН(n-q)} \right]}{U_{ТМПН(n-q)}},$$

$$\text{где } R_{ТМПН(n-q)} = \frac{10^3 \Delta P_{кз.ТМПН(n-q)} U_{ном.ТМПН(n-q)}^2}{S_{ном.ТМПН(n-q)}^2};$$

$$X_{ТМПН(n-q)} = 10 U_{к.ТМПН(n-q),\%} \frac{U_{ном.ТМПН(n-q)}^2}{S_{ном.ТМПН(n-q)}}$$

к 25

к 24

25

Расчет напряжения на выходе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$U_{2nm(n-q)} = k_{ТМПН(n-q)} U_{ТМПН(n-q)} + \Delta U_{ТМПН(n-q)}$$

26

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на выходе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$P_{2nm(n-q)} = P_{ТМПН(n-q)} + \Delta P_{ТМПН(n-q)}; Q_{2nm(n-q)} = Q_{ТМПН(n-q)} + \Delta Q_{ТМПН(n-q)};$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{2nm(n-q)}^2 + Q_{2nm(n-q)}^2}$$

27

Расчет коэффициента загрузки  $(n - q)$ -ого понижающего трансформатора

$$\beta_{nm(n-q)} = \frac{S_{nm(n-q)}}{10^3 S_{ном.nm(n-q)}}$$

28

Расчет потерь активной, реактивной и полной мощности на  $(n - q)$ -ом понижающем трансформаторе

$$\Delta P_{nm(n-q)} = 10^3 (\Delta P_{xx.nm(n-q)} + \beta_{nm(n-q)}^2 \Delta P_{кз.nm(n-q)});$$

$$\Delta Q_{nm(n-q)} = 10^3 (\Delta Q_{xx.nm(n-q)} + \beta_{nm(n-q)}^2 \Delta Q_{кз.nm(n-q)}); \Delta S_{nm(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{nm(n-q)}^2 + \Delta Q_{nm(n-q)}^2}$$

29

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на входе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$P_{1nm(n-q)} = P_{2nm(n-q)} + \Delta P_{mn(n-q)}; Q_{1nm(n-q)} = Q_{2nm(n-q)} + \Delta Q_{mn(n-q)};$$

$$S_{1nm(n-q)} = \sqrt{P_{1nm(n-q)}^2 + Q_{1nm(n-q)}^2}$$

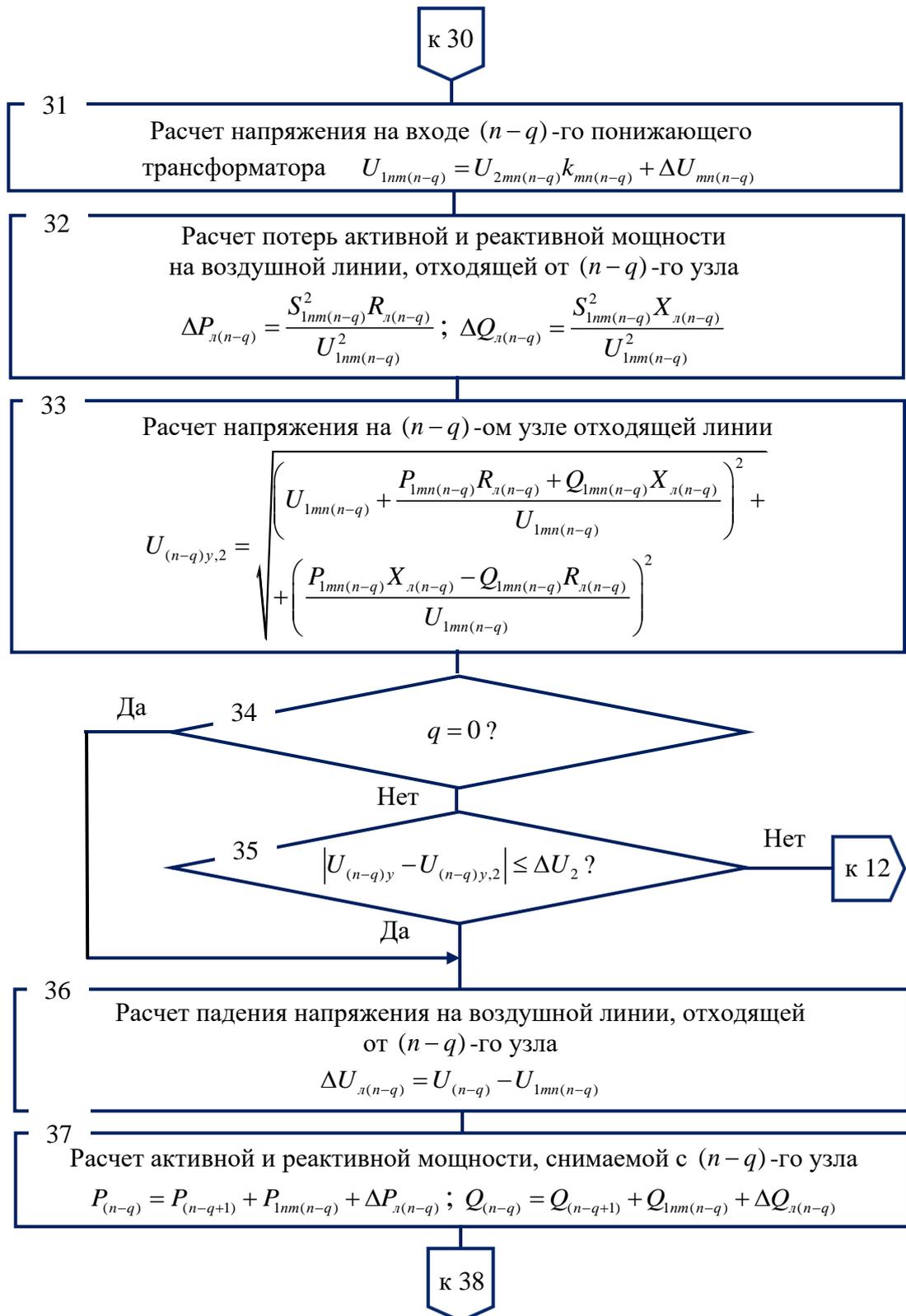
30

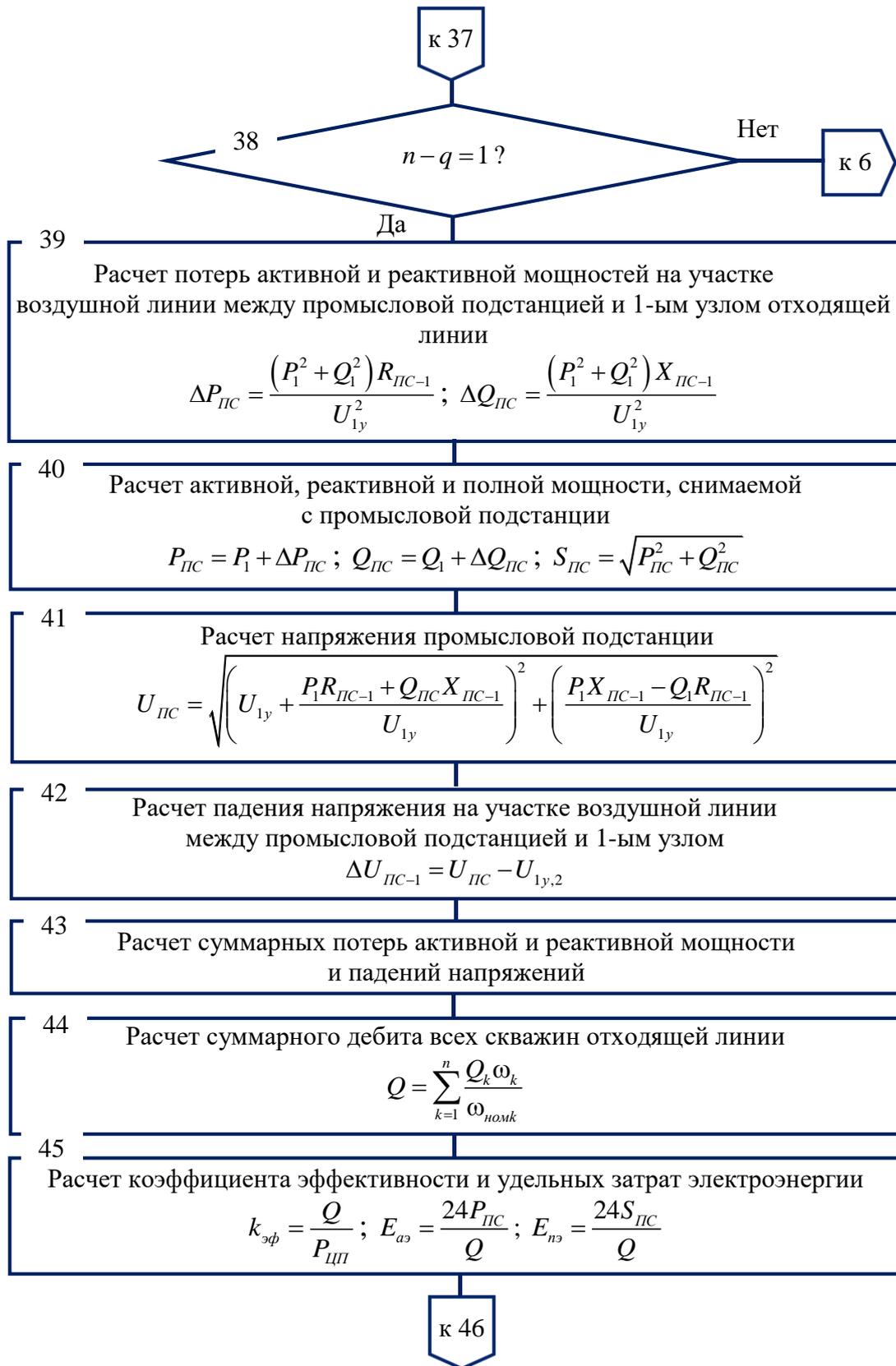
Расчет потерь напряжения на  $(n - q)$ -ом понижающем трансформаторе

$$\Delta U_{nm(n-q)} = \frac{R_{nm(n-q)} P_{2nm(n-q)} + X_{nm(n-q)} Q_{2nm(n-q)}}{U_{2nm(n-q)}},$$

$$\text{где } R_{nm(n-q)} = \frac{\Delta P_{кз.nm(n-q)} U_{2ном.nm(n-q)}^2}{S_{nm(n-q)}}, X_{nm(n-q)} = 10 U_{к.нм(n-q),\%} \frac{U_{2ном.nm(n-q)}^2}{S_{ном.nm(n-q)}}$$

к 31





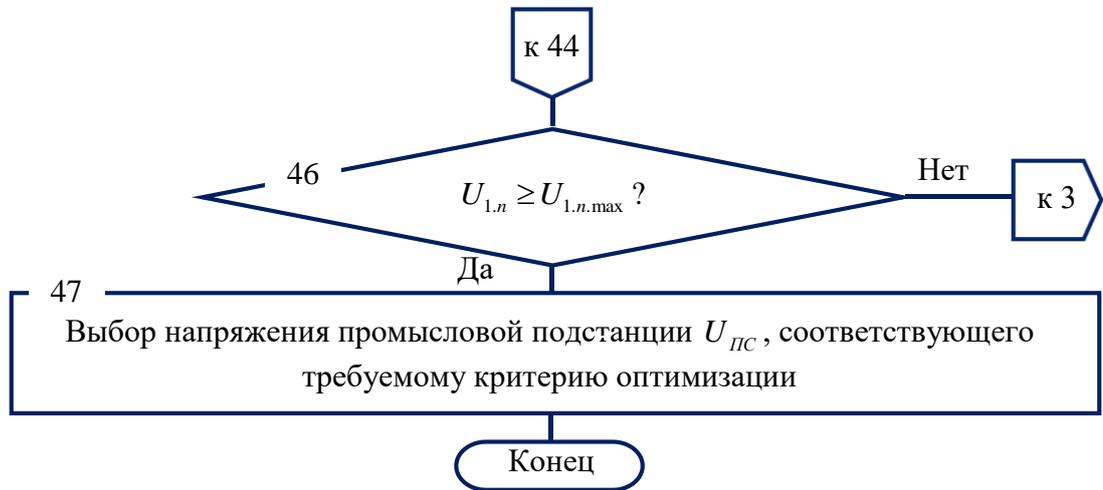


Рисунок 16 – Алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для отходящей линии, содержащей электротехнические комплексы добывающих скважин с погружными центробежными насосами

Во втором блоке присваивается условный номер шага расчетов  $i = -1$ . Затем организуется цикл расчетов с вариацией напряжения на самом удаленном двигателе с погружным насосом. В третьем блоке (операторе присвоения) к предыдущему номеру шага расчета прибавляется 1. Поэтому расчет начинается при  $i = 0$  и в четвертом операторе рассчитывается напряжение на самом удаленном двигателе, подключенном к  $n$ -ому узлу отходящей линии  $U_{1n} = U_{1n.min} + i\Delta U_{step.n}$ . То есть сначала принимается минимально допустимая величина фазного напряжения на самом удаленном двигателе.

В пятом блоке переменной  $q$ , с помощью которой организуется цикл расчетов для каждого узла отходящей линии, присваивается значение  $q = -1$ . В шестом блоке к предыдущему значению  $q$  прибавляется 1, то есть  $q$  становится равной 0. Следующий блок производит сравнение величины  $q$  с нулем и поскольку на первом шаге этого цикла (цикла узлов) так оно и есть, то разработанная методика и алгоритм расчета отправляют нас к блоку 14, в котором по формуле (75) рассчитывается скорость вращения  $(n - q)$ -го ПЭД  $\omega_{(n-q)}$ . Затем в блоках 15 – 24 по формулам (30) – (39) рассчитываются фак-

тические скольжения  $s_{(n-q)}$ ; потребление двигателем активной  $P_{ПЭД(n-q)}$  и реактивной  $Q_{ПЭД(n-q)}$  мощности; потери мощности  $\Delta P_{кл(n-q)}$  и  $\Delta Q_{кл(n-q)}$  на соединительном кабеле, активная  $P_{ТМПН(n-q)}$ , реактивная  $Q_{ТМПН(n-q)}$  и полная  $S_{ТМПН(n-q)}$  нагрузка на выходе повышающего трансформатора; падение напряжения  $\Delta U_{кл(n-q)}$  на соединительном кабеле, напряжение  $U_{ТМПН(n-q)}$  на выходе ТМПН; коэффициент загрузки  $\beta_{ТМПН(n-q)}$ , потери мощности  $\Delta P_{ТМПН(n-q)}$ ,  $\Delta Q_{ТМПН(n-q)}$ ,  $\Delta S_{ТМПН(n-q)}$  и падение напряжения  $\Delta U_{ТМПН(n-q)}$  на этом трансформаторе.

Затем расчет переходит в блок 25, в котором по формуле

$$U_{2nm(n-q)} = \frac{U_{ТМПН(n-q)}}{k_{ТМПН(n-q)}} + \Delta U_{ТМПН(n-q)} \quad (85)$$

определяется напряжение  $U_{2nm(n-q)}$  на вторичной обмотке понижающего трансформатора, обеспечивающего требуемое напряжение  $U_{1(n-q)}$  на статоре соответствующего ПЭД. В блоках 26 – 31 по формулам

$$P_{2nm(n-q)} = P_{ТМПН(n-q)} + \Delta P_{ТМПН(n-q)}; \quad (86)$$

$$Q_{2nm(n-q)} = Q_{ТМПН(n-q)} + \Delta Q_{ТМПН(n-q)}; \quad (87)$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{2nm(n-q)}^2 + Q_{2nm(n-q)}^2}; \quad (88)$$

$$\beta_{nm(n-q)} = \frac{S_{2nm(n-q)}}{10^3 S_{ном. nm(n-q)}}; \quad (89)$$

$$\Delta P_{nm(n-q)} = 10^3 (\Delta P_{xx.nm(n-q)} + \beta_{nm(n-q)}^2 \Delta P_{кз.nm(n-q)}); \quad (90)$$

$$\Delta Q_{nm(n-q)} = 10^3 (\Delta Q_{xx.nm(n-q)} + \beta_{nm(n-q)}^2 \Delta Q_{кз.nm(n-q)}); \quad (91)$$

$$\Delta S_{nm(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{nm(n-q)}^2 + \Delta Q_{nm(n-q)}^2}; \quad (92)$$

$$P_{1nm(n-q)} = P_{2mn(n-q)} + \Delta P_{mn(n-q)}; \quad (93)$$

$$Q_{1nm(n-q)} = Q_{2mn(n-q)} + \Delta Q_{mn(n-q)}; \quad (94)$$

$$S_{1nm(n-q)} = \sqrt{P_{1nm(n-q)}^2 + Q_{1nm(n-q)}^2}; \quad (95)$$

$$\Delta U_{nm(n-q)} = \frac{R_{nm(n-q)}P_{2nm(n-q)} + X_{nm(n-q)}Q_{2nm(n-q)}}{U_{2nm(n-q)}}; \quad (96)$$

$$U_{1nm(n-q)} = U_{2nm(n-q)}k_{mn(n-q)} + \Delta U_{mn(n-q)} \quad (97)$$

находятся активная  $P_{2nm(n-q)}$ , реактивная  $Q_{2nm(n-q)}$ , полная  $S_{2nm(n-q)}$  нагрузка, коэффициент загрузки  $\beta_{nm(n-q)}$ , потери мощности  $\Delta P_{nm(n-q)}$ ,  $\Delta Q_{nm(n-q)}$ ,  $\Delta S_{nm(n-q)}$   $(n-q)$ -го понижающего трансформатора, а также активная  $P_{1nm(n-q)}$ , реактивная  $Q_{1nm(n-q)}$  и полная  $S_{1nm(n-q)}$  мощность на входе понижающего трансформатора, падение напряжения  $\Delta U_{nm(n-q)}$  и напряжение  $U_{1nm(n-q)}$  первичной обмотки этого трансформатора.

Затем в блоках 32 и 33 по формулам

$$\Delta P_{l(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 R_{l(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}; \quad (98)$$

$$\Delta Q_{l(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 X_{l(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}; \quad (99)$$

$$U_{(n-q)y,2} = \sqrt{\left( U_{1nm(n-q)} + \frac{P_{1nm(n-q)}R_{l(n-q)} + Q_{1nm(n-q)}X_{l(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{1nm(n-q)}X_{l(n-q)} - Q_{1nm(n-q)}R_{l(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}} \right)^2} \quad (100)$$

рассчитываются потери активной  $\Delta P_{l(n-q)}$  и реактивной  $\Delta Q_{l(n-q)}$  мощности на воздушной линии, соединяющей  $(n-q)$ -ый узел отходящей линии с соответствующим трансформатором, и напряжение  $U_{(n-q)y,2}$  на этом узле.

Если идет первый шаг цикла узлов, то есть  $q=0$ , то в алгоритме расчета происходит переход в блок 36, где происходит расчет падения напряжения

$$\Delta U_{l(n-q)} = U_{(n-q)} - U_{1nm(n-q)} \quad (101)$$

на воздушной линии, соединяющей  $(n-q)$ -ый узел отходящей линии с понижающим трансформатором. Затем в блоке 37 находится активная  $P_{(n-q)}$  и

реактивная  $Q_{(n-q)}$  мощность, снимаемая с  $(n-q)$ -ого узла

$$P_{(n-q)} = P_{(n-q+1)} + P_{l(n-q)} + \Delta P_{l(n-q)}; \quad (102)$$

$$Q_{(n-q)} = Q_{(n-q+1)} + Q_{l(n-q)} + \Delta Q_{l(n-q)}. \quad (103)$$

И поскольку на первом шаге цикла узлов  $(n-q) \neq 1$ , то в алгоритме расчета оптимального напряжения промышленной подстанции происходит переход в блок 6, где начинается новый шаг в цикле узлов. В этом случае  $q \neq 0$ , поэтому в блоках 8 – 10 по формулам

$$\Delta P_{l(n-q),(n-q+1)} = \frac{(P_{(n-q+1)}^2 + Q_{(n-q+1)}^2) R_{l(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}^2}; \quad (104)$$

$$\Delta Q_{l(n-q),(n-q+1)} = \frac{(P_{(n-q+1)}^2 + Q_{(n-q+1)}^2) X_{l(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}^2}; \quad (105)$$

$$P_{(n-q),(n-q+1)} = P_{(n-q+1)} + \Delta P_{l(n-q),(n-q+1)}; \quad (106)$$

$$Q_{(n-q),(n-q+1)} = Q_{(n-q+1)} + \Delta Q_{l(n-q),(n-q+1)}; \quad (107)$$

$$U_{(n-q)y} = \sqrt{\left( U_{(n-q+1)} + \frac{P_{(n-q+1)} R_{l(n-q),(n-q+1)} + Q_{(n-q+1)} X_{l(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{(n-q+1)} X_{l(n-q),(n-q+1)} - Q_{(n-q+1)} R_{l(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}} \right)^2} \quad (108)$$

вычисляются активные  $\Delta P_{l(n-q),(n-q+1)}$  и реактивные  $\Delta Q_{l(n-q),(n-q+1)}$  потери мощности на воздушной линии, соединяющей  $(n-q)$ -ый и  $(n-q+1)$ -ый узлы отходящей линии и определяются значения активной  $P_{(n-q),(n-q+1)}$  и реактивной  $Q_{(n-q),(n-q+1)}$  мощности, снимаемой с  $(n-q)$ -го узла отходящей линии для питания более удаленных узлов, и напряжение  $U_{(n-q)y}$  на узле с номером  $(n-q)$ .

Затем алгоритм расчета переходит в блок 11, где переменной  $m$  присваивается начальное значение  $m = -1$ , после чего в блоке 12 к этому значению прибавляется 1 и начинается цикл подбора напряжения на статоре  $(n-q)$ -го асинхронного двигателя, которое должно быть при напряжении

$U_{(n-q)y}$ . Поэтому в блоке 13 рассчитывается значение фазного напряжения на статоре  $(n - q)$ -го асинхронного двигателя

$$U_{1(n-q)} = U_{1\min(n-q)} + m\Delta U. \quad (109)$$

Далее вычислительные процедуры переходят в блок 14 и повторяются те же самые расчеты, которые были при  $q = 0$ . Единственная отличительная особенность вычислений при  $q \neq 0$  заключается в том, что после блока 33 происходит переход в блок 35, где сравниваются значения  $U_{(n-q)y,2}$  с  $U_{(n-q)y}$ . Если они не совпадают, опять происходит переход в блок 12 и повторяются все расчеты, пока  $U_{(n-q)y,2}$  и  $U_{(n-q)y}$  не совпадут с некоторой допустимой погрешностью  $\Delta U_2$ .

При выполнении условия  $|U_{(n-q)y} - U_{(n-q)y,2}| \leq \Delta U_2$  вычислительные процедуры переходят в блоки 36 и 37 и затем циклы узлов и подбора напряжения на статоре  $(n - q)$ -го асинхронного двигателя повторяются до тех пор, пока в блоке 38 не зафиксируется значение  $(n - q) = 1$ , подтверждающее, что расчеты по всем узлам отходящей линии завершены.

После этого в блоках 39 – 45 по формулам

$$\Delta P_{ПС} = \frac{(P_1^2 + Q_1^2)R_{ПС-1}}{U_{1y}^2}; \quad (110)$$

$$\Delta Q_{ПС} = \frac{(P_1^2 + Q_1^2)X_{ПС-1}}{U_{1y}^2}; \quad (111)$$

$$P_{ПС} = P_1 + \Delta P_{ПС}; \quad (112)$$

$$Q_{ПС} = Q_1 + \Delta Q_{ПС}; \quad (113)$$

$$S_{ПС} = \sqrt{P_{ПС}^2 + Q_{ПС}^2}; \quad (114)$$

$$U_{ПС} = \sqrt{\left( U_{1y} + \frac{P_1 R_{ПС-1} + Q_{ПС} X_{ПС-1}}{U_{1y}} \right)^2 + \left( \frac{P_1 X_{ПС-1} - Q_1 R_{ПС-1}}{U_{1y}} \right)^2}; \quad (115)$$

$$\Delta U_{ПС-1} = U_{ПС} - U_{1y,2} \quad (116)$$

происходит последовательный расчет активных  $\Delta P_{ПС}$  и реактивных  $\Delta Q_{ПС}$  потерь мощности на воздушной линии, соединяющей промышленную подстанцию с 1-ым узлом отходящей линии; активной  $P_{ПС}$ , реактивной  $Q_{ПС}$  и полной  $S_{ПС}$  мощности, потребляемой от промышленной подстанции; напряжения  $U_{ПС}$  промышленной подстанции; падения напряжения  $\Delta U_{ПС-1}$  на воздушной линии, соединяющей центр питания с первым узлом, суммарные потери активной и реактивной мощности; сумма всех падений напряжений на всех элементах принципиальной схемы отходящей линии. Кроме того суммарный дебит  $Q$  всех скважин, подключенных к рассматриваемой отходящей линии; коэффициент эффективности  $k_{эф}$  и удельные затраты энергии активной  $E_{аэ}$  и полной  $E_{нэ}$  энергии

$$Q = \sum_{k=1}^n \frac{Q_k \omega_k}{\omega_{номk}}; \quad (117)$$

$$k_{эф} = \frac{Q}{P_{цп}}; \quad (118)$$

$$E_{аэ} = \frac{24P_{ПС}}{Q}; \quad (119)$$

$$E_{нэ} = \frac{24S_{ПС}}{Q}. \quad (120)$$

Далее в блоке 46 сравнивается напряжение на самом удаленном двигателе с максимально допустимым значением  $U_{1,maxn}$ . Если оно не достигнуто, то происходит переход в третий блок и повторяются все описанные выше расчеты для другого напряжения на статоре самого удаленного двигателя с номером  $n$ .

После перебора всех возможных значений  $U_{1,n}$  с шагом  $\Delta U_{step,n}$  вычислительные процедуры заканчиваются и в блоке 47 происходит выбор оптимального значения напряжения промышленной подстанции, соответствующего требуемому критерию оптимизации.

Приведенный алгоритм довольно просто реализуется, например, в про-

граммной среде MathCAD.

Воспользуемся разработанным алгоритмом для поиска оптимального напряжения промышленной подстанции для гипотетической отходящей линии, приведенной на рисунке 15. Производя расчеты для ряда значений напряжения статора самого удаленного ПЭД:  $\Delta U_{1ПЭД3} = -0,1U_{1.ном.ПЭД3}$ ;  $\Delta U_{1ПЭД3} = -0,05U_{1.ном.ПЭД3}$ ,  $\Delta U_{1ПЭД3} = -0,025U_{1.ном.ПЭД3}$ ,  $\Delta U_{1ПЭД3} = 0$ ,  $\Delta U_{1ПЭД3} = 0,025U_{1.ном.ПЭД3}$ ,  $\Delta U_{1ПЭД3} = 0,05U_{1.ном.ПЭД3}$  и  $\Delta U_{1ПЭД3} = 0,1U_{1.ном.ПЭД3}$ , – получим данные для выбора оптимального значения напряжения промышленной подстанции гипотетической отходящей линии нефтяного промысла  $U_{ПС}$  (таблица 3).

Таблица 3 – Зависимости параметров энергетической эффективности от напряжения промышленной подстанции для гипотетической отходящей линии

$\Delta U_3, \%$	-10	-5	-2,5	0	2,5	5	10
$\Delta P, \text{кВт}$	15,83	15,68	<b>15,64</b>	16,44	16,93	16,99	17,18
$U_{ПС}, \text{В}$	5486	5765	5905	6047	6192	6333	6614
$P_{ПС}, \text{кВт}$	<b>153,2</b>	155,1	156,1	158,0	159,6	160,7	163,2
$Q_{ПС}, \text{кВАр}$	125,7	132,2	135,5	147,8	156,5	160,5	168,7
$Q, \text{м}^3/\text{сут}$	260,8	262,1	262,8	263,5	264,2	264,9	266,4
$k_{эф} = \frac{Q}{P_{ПС}}, \text{м}^3/\text{сут}\cdot\text{кВт}$	<b>1,702</b>	1,69	1,683	1,668	1,656	1,648	1,632
$E_{ав} = \frac{24P_{ПС}}{Q}, \text{кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^3$	<b>14,10</b>	14,20	14,26	14,39	14,50	14,56	14,70
$S_{ПС}, \text{кВА}$	<b>198,2</b>	203,8	206,7	216,4	223,5	227,1	234,7
$E_{нэ} = \frac{24S_{ПС}}{Q}, \text{кВА}\cdot\text{час}/\text{м}^3$	<b>18,24</b>	18,66	18,88	19,71	20,3	20,6	21,1

Анализ данных таблицы 3 показывает, что в зависимости от критерия оптимизации напряжение промышленной подстанции необходимо выбирать разным.

Если исходить из обеспечения минимума активных потерь в воздушных и кабельных линиях и трансформаторах, то необходимо выбрать напря-

жение промышленной подстанции  $U_{ПС} = 5905$  В, при котором на статоре самого удаленного ПЭДЗ напряжение будет меньше номинального на 2,5 %. В этом случае потери в линиях и трансформаторах составят  $\Delta P = 15,64$  кВт.

Если в качестве критерия оптимизации выбрать минимум потребления активной  $P_{ПС}$  и полной мощности  $S_{ПС}$  отходящей от промышленной подстанции линии минимум удельных затрат электроэнергии  $E_{аз}$  и  $E_{нэ}$  на добычу кубометра жидкости из скважин или максимум коэффициента эффективности, то оптимальным будет напряжение  $U_{ПС} = 5486$  В, при котором на статоре самого удаленного ПЭДЗ напряжение будет меньше номинального на 10 %.

Следует отметить, что разность потребления активной мощности при вариации напряжения промышленной подстанции от 5486 В до 6614 В составляет 10 кВт, то есть изменяется на 6,5% относительно оптимального значения. Потребление полной мощности при этом изменяется на 36,5 кВА, что составляет 18,4 % от оптимальной величины.

Если каждый из ПЭД снабдить индивидуальной конденсаторной установкой для компенсации реактивной мощности, то принципиальная схема рассматриваемой гипотетической отходящей линии примет следующий вид (рисунок 17).

Применим разработанный алгоритм (рисунок 16) для расчета и выбора оптимальной величины промышленной подстанции для этого случая. Произведем вариацию напряжения  $U_{1ПЭДЗ}$  в тех же самых пределах от  $0,9U_{1ПЭДЗ.ном}$  до  $1,1U_{1ПЭДЗ.ном}$  и сведем полученные результаты в таблицу 4.

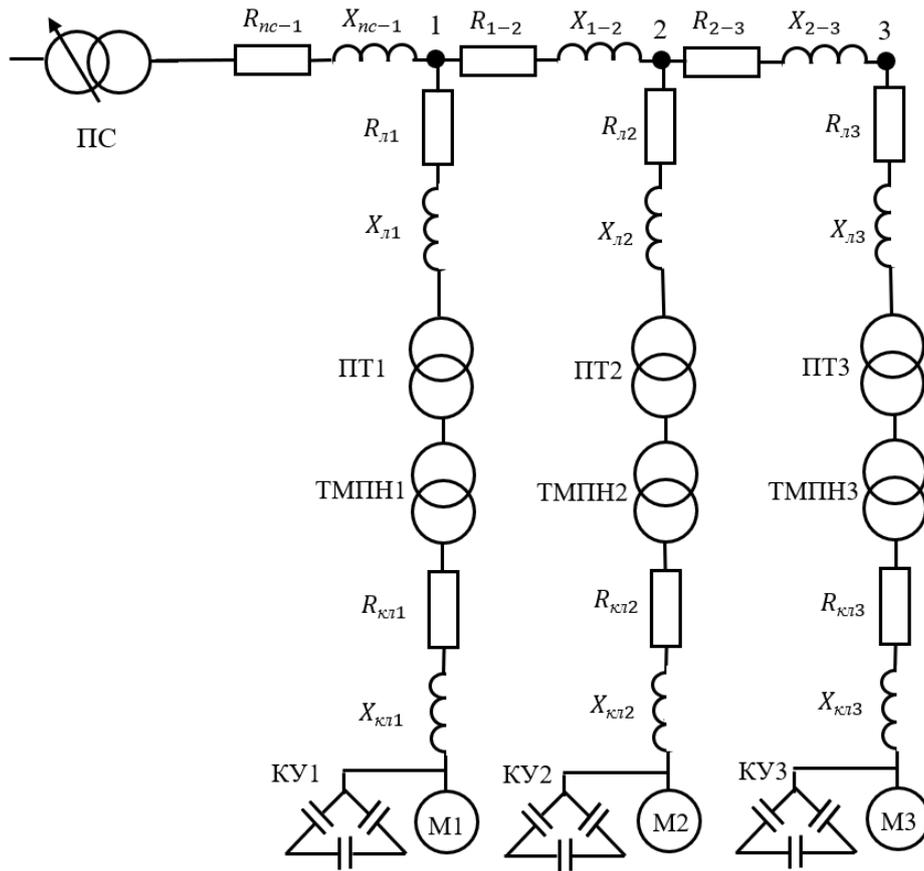


Рисунок 17 – Принципиальная схема гипотетической отходящей линии с тремя ПЭД, оснащенной индивидуальными конденсаторными батареями

Таблица 4 – Зависимости параметров энергетической эффективности от напряжения промышленной подстанции для гипотетической отходящей линии, приведенной на рисунке 17, с учетом индивидуальных конденсаторных батарей

$\Delta U_3, \%$	-10	-5	-2,5	0	2,5	5	10
$\Delta P, \text{ кВт}$	11,36	10,89	10,69	10,75	10,71	10,55	<b>10,27</b>
$U_{ПС}, \text{ В}$	5444	5720	5858	5999	6143	6282	6561
$P_{ПС}, \text{ кВт}$	<b>148,7</b>	150,3	151,1	152,2	153,3	154,2	156,2
$Q_{ПС}, \text{ кВАр}$	53,5	51,9	50,8	58,2	61,9	61,2	59,6
$Q, \text{ м}^3/\text{сут}$	260,7	262,1	262,8	263,5	264,2	264,9	266,3
$k_{эф} = \frac{Q}{P_{ПС}}, \text{ м}^3/\text{сут} \cdot \text{кВт}$	<b>1,754</b>	1,744	1,739	1,731	1,723	1,717	1,705
$E_{ав} = \frac{24P_{ПС}}{Q}, \text{ кВт} \cdot \text{час}/\text{м}^3$	<b>13,68</b>	13,76	13,80	13,87	13,93	13,97	14,08
$S_{ПС}, \text{ кВА}$	<b>158,0</b>	159,0	159,4	163,0	165,3	165,9	167,2
$E_{но} = \frac{24S_{ПС}}{Q}, \text{ кВА} \cdot \text{час}/\text{м}^3$	<b>14,545</b>	14,557	14,562	14,85	15,02	15,03	15,07

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы. Для обеспечения минимума активных потерь в воздушных и кабельных линиях и трансформаторах необходимо выбрать напряжение промышленной подстанции  $U_{ПС} = 6561$  В, при котором на статоре самого удаленного ПЭДЗ напряжение будет больше номинального на 10 %. В этом случае потери в линиях и трансформаторах составят  $\Delta P = 10,27$  кВт. Для достижения минимума потребления активной  $P_{ПС}$  и полной мощности  $S_{ПС}$  отходящей от промышленной подстанции линии и минимума удельных затрат электроэнергии  $E_{аз}$  и  $E_{нэ}$  на добычу кубометра жидкости из скважин или максимум коэффициента эффективности оптимальным будет напряжение  $U_{ПС} = 5444$  В, что соответствует напряжению на самом удаленном ПЭД на 10 % меньше номинального.

Изменение напряжения промышленной подстанции от 5444 В до 6561 В приводит к изменению потребления активной мощности электротехническими комплексами добывающих скважин на 7,5 кВт, то есть изменяется на 5 %. Потребление полной мощности при этом изменяется на 9,2 кВА, что составляет 5,8 % от оптимальной величины.

Полученные результаты являются убедительным доказательством необходимости регулирования напряжения промышленной подстанции.

### **3.2 Расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции для отходящей линии с тремя ШСНУ**

Очевидно, что тип погружного насоса также влияет на величину оптимального напряжения промышленной подстанции. Поэтому рассмотрим гипотетическую отходящую линию, к которой подключены три одинаковых штанговых скважинных насосных установок (рисунок 18).

ШСНУ оснащены асинхронными двигателями ВА132S6 со следующими номинальными данными: мощность  $P_{ном} = 5,5$  кВт; линейное напряжение  $U_{1л.ном} = 380$  В; ток  $I_{1.ном} = 12,3$  А; коэффициент полезного действия  $\eta_{ном} = 85$  %;  $\cos\varphi = 0,8$ ; скольжение  $s_{ном} = 0,033$ ; число пар полюсов  $Z_n = 3$ ; скорость идеального холостого хода  $\omega_{0\_50} = 104,7$  рад/с; номинальная скорость  $\omega_{ном} = 101,264$  рад/с; номинальный момент  $M_{ном} = 54,313$  Нм;  $R_{2Г} = 0,732$  Ом;  $X_k = 3,249$  Ом;  $X_m = 33,921$  Ом;  $k_{\partial y}^{U_1} = 0,0096$  рад/Вс.

Каждая скважина оснащена плунжерным насосом НСН 2В с цепным приводом ЦП-60, рассмотренным выше и характеризуется следующими параметрами:  $Q_{нас} = 9,5$  м<sup>3</sup>/сутки,  $k_{M2} = 0,0495$  Нмс<sup>2</sup>/рад<sup>2</sup>,  $M_{G1} = 39,46$  Нм,  $M_{G2} = 8,061$  Нм.

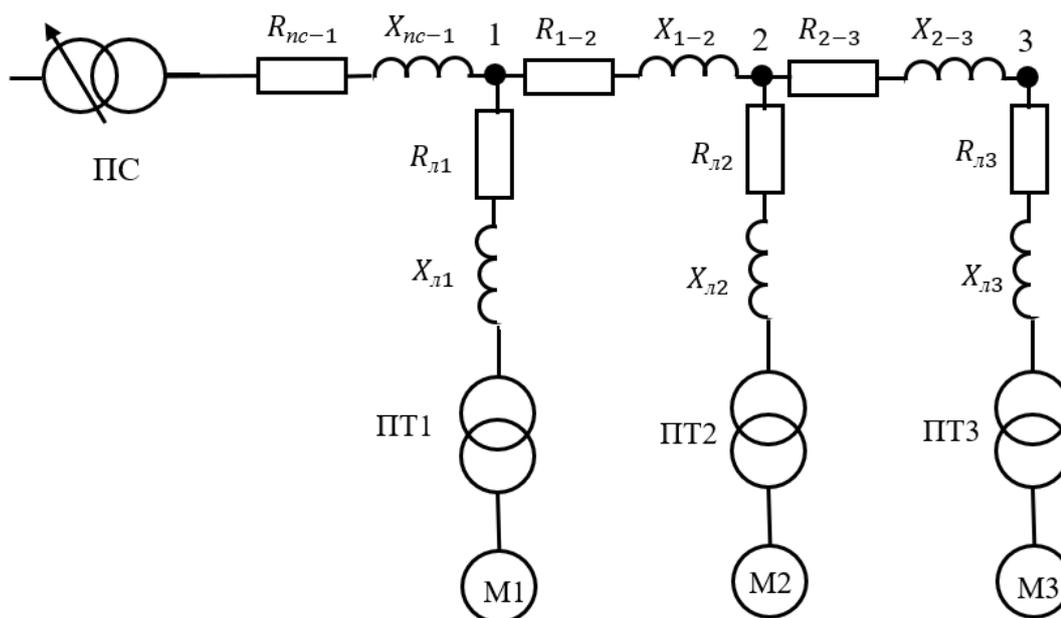


Рисунок 18 – Принципиальная схема гипотетической отходящей линии с тремя ШСНУ

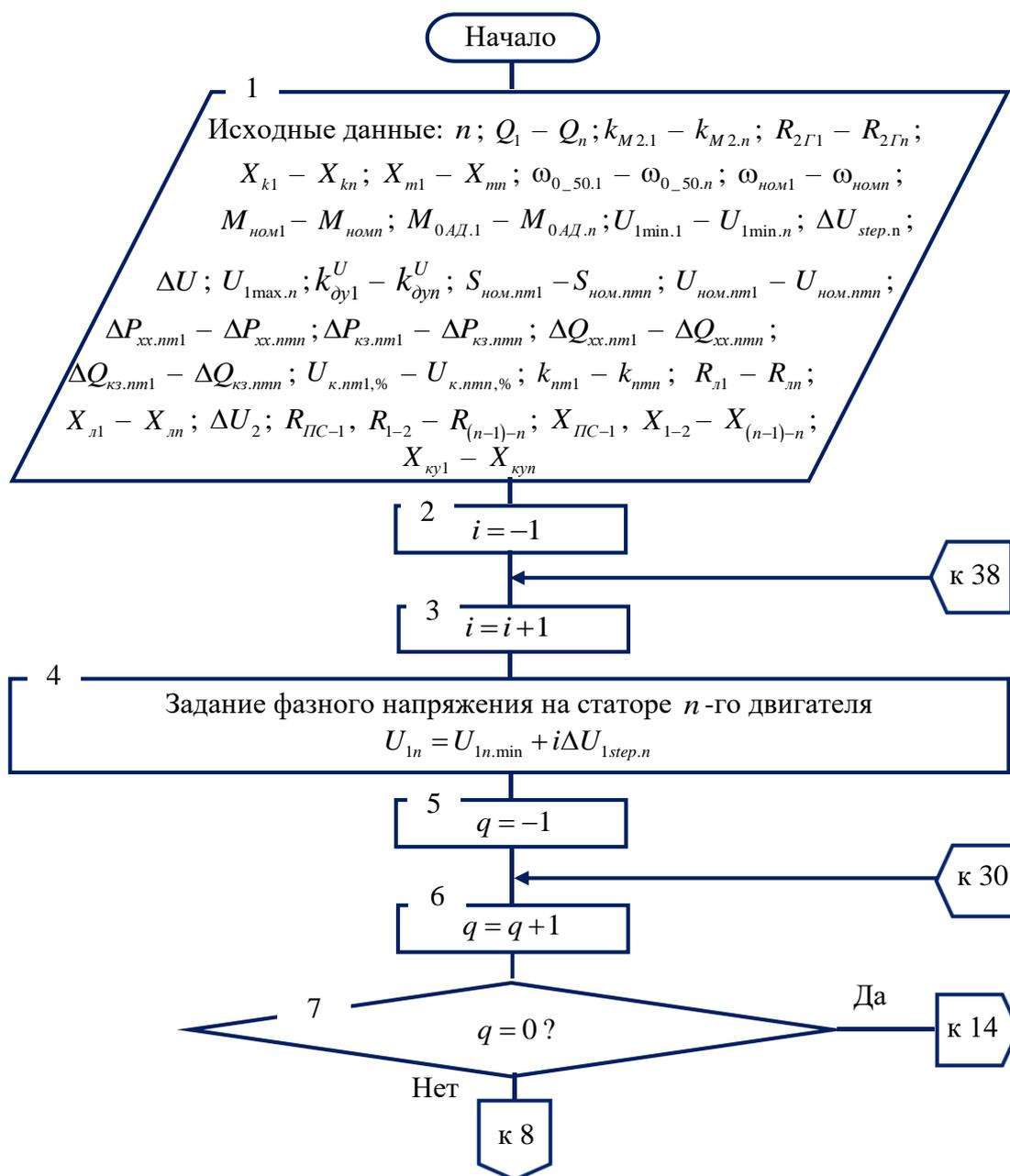
Для сопряжения с воздушной линией электропередач в каждом электротехническом комплексе добывающей скважины применен понижающий трансформатор 6/0,4 кВ с номинальной мощностью 25 кВА, коэффициентом трансформации  $k_{nm} = 15$  и следующими паспортными данными:

$\Delta P_{xx.nm} = 0,11$  кВт;  $\Delta P_{кз.nm} = 0,6$  кВт;  $U_{к.nm,\%} = 4,5\%$ ;  $I_{xx.nm,\%} = 2,7\%$ . Сопротивления воздушных линий, соединяющих понижающие трансформаторы с узлами отходящей линии, имеют следующие значения:  $R_{л1} = 0,69$  Ом;  $X_{л1} = 0,578$  Ом;  $R_{л2} = 0,368$  Ом;  $X_{л2} = 0,308$  Ом;  $R_{л3} = 0,92$  Ом;  $X_{л3} = 0,77$  Ом. Участки отходящей линии между узлами характеризуются сопротивлениями:  $R_{ПС-1} = 0,825$  Ом;  $X_{ПС-1} = 0,585$  Ом;  $R_{1-2} = 0,99$  Ом;  $X_{1-2} = 0,702$  Ом;  $R_{2-3} = 0,495$  Ом;  $X_{2-3} = 0,351$  Ом.

Очевидно, что и в этом случае расчет необходимо вести от самого удаленного электроприемника, то есть от наземного асинхронного двигателя АДЗ, подключенного к 3-му узлу отходящей линии. Однако, поскольку при питании двигателей ШСНУ не используется повышающий трансформатор и длинная кабельная линия алгоритм расчета оптимального напряжения будет выглядеть следующим образом (рисунок 19).

Исходными данными для расчета являются: количество узлов  $n$ ; производительности  $Q_1 - Q_n$  насосов при номинальной скорости двигателей; коэффициенты  $k_{M2.1} - k_{M2.n}$ ; параметры Г-образной схемы замещения наземных асинхронных двигателей  $R_{2Г1} - R_{2Гn}$ ,  $X_{к1} - X_{kn}$ ,  $X_{m1} - X_{mn}$ ; скорости идеального холостого хода  $\omega_{0.50.1} - \omega_{0.50.n}$  и номинальные скорости вращения двигателей  $\omega_{ном1} - \omega_{номn}$ ; номинальные значения моментов двигателей  $M_{ном1} - M_{номn}$ ; моменты  $M_{0АД.1} - M_{0АД.n}$ ; минимально допустимые значения фазного напряжения двигателей  $U_{1min.1} - U_{1.min n}$ ; шаг приращения напряжения двигателя самого удаленного узла  $\Delta U_{step.n}$ ; шаг приращения напряжения двигателей с 1-го до  $(n-1)$ -го узла; максимально допустимое напряжение на статоре самого удаленного двигателя  $U_{1.max n}$ ; коэффициенты полезного действия двигателей  $\eta_1 - \eta_n$ ; коэффициенты передачи  $k_{дв1}^U - k_{двn}^U$ ; паспортные данные понижающих трансформаторов  $S_{ном.nm1} - S_{ном.nmn}$ ;  $U_{ном.nm1} - U_{ном.nmn}$ ;  $\Delta P_{xx.nm1} - \Delta P_{xx.nmn}$ ;  $\Delta P_{кз.nm1} - \Delta P_{кз.nmn}$ ;  $\Delta Q_{xx.nm1} - \Delta Q_{xx.nmn}$ ;  $\Delta Q_{кз.nm1} - \Delta Q_{кз.nmn}$ ;  $U_{к.nm1,\%} - U_{к.nmn,\%}$ ;

$k_{nm1} - k_{nmn}$ ;  $R_{л1} - R_{лn}$ ;  $X_{л1} - X_{лn}$ ; активные и индуктивные сопротивления воздушных линий  $R_{л1} - R_{лn}$  и  $X_{л1} - X_{лn}$ ; активные и индуктивные сопротивления  $R_{ПС-1}, R_{1-2} - R_{(n-1)-n}$ ;  $X_{ПС-1}, X_{1-2} - X_{(n-1)-n}$  между узлами отходящей линии; реактивные сопротивления конденсаторных батарей (если такие установлены), подключенных к статорным обмоткам асинхронных двигателей  $X_{кy1} - X_{кyn}$ . Причем  $M_{0АД} = \frac{M_{G1} + M_{G2}}{2}$ .



к 7

8

Расчет потерь активной и реактивной мощности на воздушной линии, соединяющей  $(n - q)$ -ый узел с  $(n - q + 1)$ -ым

$$\Delta P_{л(n-q),(n-q+1)} = \frac{(P_{(n-q+1)}^2 + Q_{(n-q+1)}^2) R_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}^2};$$

$$\Delta Q_{л(n-q),(n-q+1)} = \frac{(P_{(n-q+1)}^2 + Q_{(n-q+1)}^2) X_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}^2}$$

9

Расчет активной и реактивной мощности, снимаемой с  $(n - q)$ -го узла отходящей линии с учетом потребляемой мощности предыдущим узлом

$$P_{(n-q),(n-q+1)} = P_{(n-q+1)} + \Delta P_{л(n-q),(n-q+1)}; \quad Q_{(n-q),(n-q+1)} = Q_{(n-q+1)} + \Delta Q_{л(n-q),(n-q+1)}$$

10

Расчет напряжения на  $(n - q)$ -ом узле отходящей линии

$$U_{(n-q)y} = \sqrt{\left( U_{(n-q+1)} + \frac{P_{(n-q+1)} R_{л(n-q),(n-q+1)} + Q_{(n-q+1)} X_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{(n-q+1)} X_{л(n-q),(n-q+1)} - Q_{(n-q+1)} R_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}} \right)^2}$$

11

 $m = -1$ 

12

 $m = m + 1$ 

к 27

13

Задание напряжения на статоре  $(n - q)$ -го двигателя

$$U_{1(n-q)} = U_{1\min(n-q)} + m \Delta U$$

к 7

к 14

к 13

14 Расчет средней скорости вращения вала  $(n - q)$ -го двигателя

$$\omega_{(n-q)} = \frac{M_{ном(n-q)}\omega_{0\_50(n-q)} - M_{0АД(n-q)} \left[ \omega_{0\_50(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{дв(n-q)}^{U_1} (U_{1(n-q),ном} - U_{1(n-q)}) \right]}{M_{ном(n-q)} + k_{M2(n-q)} \left[ \omega_{0\_50(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{дв(n-q)}^{U_1} (U_{1(n-q),ном} - U_{1(n-q)}) \right]}$$

15 Расчет активной мощности, потребляемой  $(n - q)$ -ым двигателем

$$P_{АД(n-q)} = \frac{k_{M2(n-q)}\omega_{(n-q)}^2 + M_{0АД(n-q)}\omega_{(n-q)}}{\eta_{(n-q)}}$$

16 Расчет среднего скольжения ротора  $(n - q)$ -ого двигателя

$$s_{(n-q)} = \frac{\omega_{0\_50(n-q)} - \omega_{(n-q)}}{\omega_{0\_50(n-q)}}$$

17 Расчет реактивной мощности, потребляемой  $(n - q)$ -ым двигателем

$$Q_{АД(n-q)} = 3U_{1(n-q)}^2 \left[ \frac{s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}}{R_{2Г(n-q)}^2 + s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}^2} + \frac{U_{1(n-q)}^v}{X_{m(n-q)}} - \frac{1}{X_{ку(n-q)}} \right]$$

18 Расчет напряжения и активной, реактивной и полной нагрузки на выходе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$U_{2nm(n-q)} = \sqrt{3}U_{1(n-q)}; P_{2nm(n-q)} = P_{АД(n-q)}; Q_{2nm(n-q)} = Q_{АД(n-q)};$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{АД(n-q)}^2 + Q_{АД(n-q)}^2}$$

19 Расчет коэффициента загрузки  $(n - q)$ -ого понижающего трансформатора

$$\beta_{nm(n-q)} = \frac{S_{2nm(n-q)}}{10^3 S_{ном.nm(n-q)}}$$

к 20

к 19

20

Расчет потерь активной, реактивной и полной мощности на  $(n - q)$ -ом понижающем трансформаторе

$$\Delta P_{nm(n-q)} = 10^3 \left( \Delta P_{xx.nm(n-q)} + \beta_{nm(n-q)}^2 \Delta P_{кз.nm(n-q)} \right);$$

$$\Delta Q_{nm(n-q)} = 10^3 \left( \Delta Q_{xx.nm(n-q)} + \beta_{nm(n-q)}^2 \Delta Q_{кз.nm(n-q)} \right); \Delta S_{nm(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{nm(n-q)}^2 + \Delta Q_{nm(n-q)}^2}$$

21

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на входе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$P_{1nm(n-q)} = P_{2mn(n-q)} + \Delta P_{mn(n-q)}; Q_{1nm(n-q)} = Q_{2mn(n-q)} + \Delta Q_{mn(n-q)};$$

$$S_{1nm(n-q)} = \sqrt{P_{1nm(n-q)}^2 + Q_{1nm(n-q)}^2}$$

22

Расчет потерь напряжения на  $(n - q)$ -ом понижающем трансформаторе

$$\Delta U_{nm(n-q)} = \frac{R_{nm(n-q)} P_{nm(n-q)} + X_{nm(n-q)} Q_{nm(n-q)}}{k_{nm(n-q)}^2 U_{nm(n-q)}},$$

$$\text{где } R_{nm(n-q)} = \frac{10^3 \Delta P_{кз.nm(n-q)} U_{ном.nm(n-q)}^2}{S_{nm(n-q)}^2} \quad X_{nm(n-q)} = 10 U_{к.nm(n-q),\%} \frac{U_{ном.nm(n-q)}^2}{S_{ном.nm(n-q)}}$$

23

Расчет напряжения на входе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора  $U_{1nm(n-q)} = U_{2mn(n-q)} k_{mn(n-q)} + \Delta U_{mn(n-q)}$

24

Расчет потерь активной и реактивной мощности на воздушной линии, отходящей от  $(n - q)$ -го узла

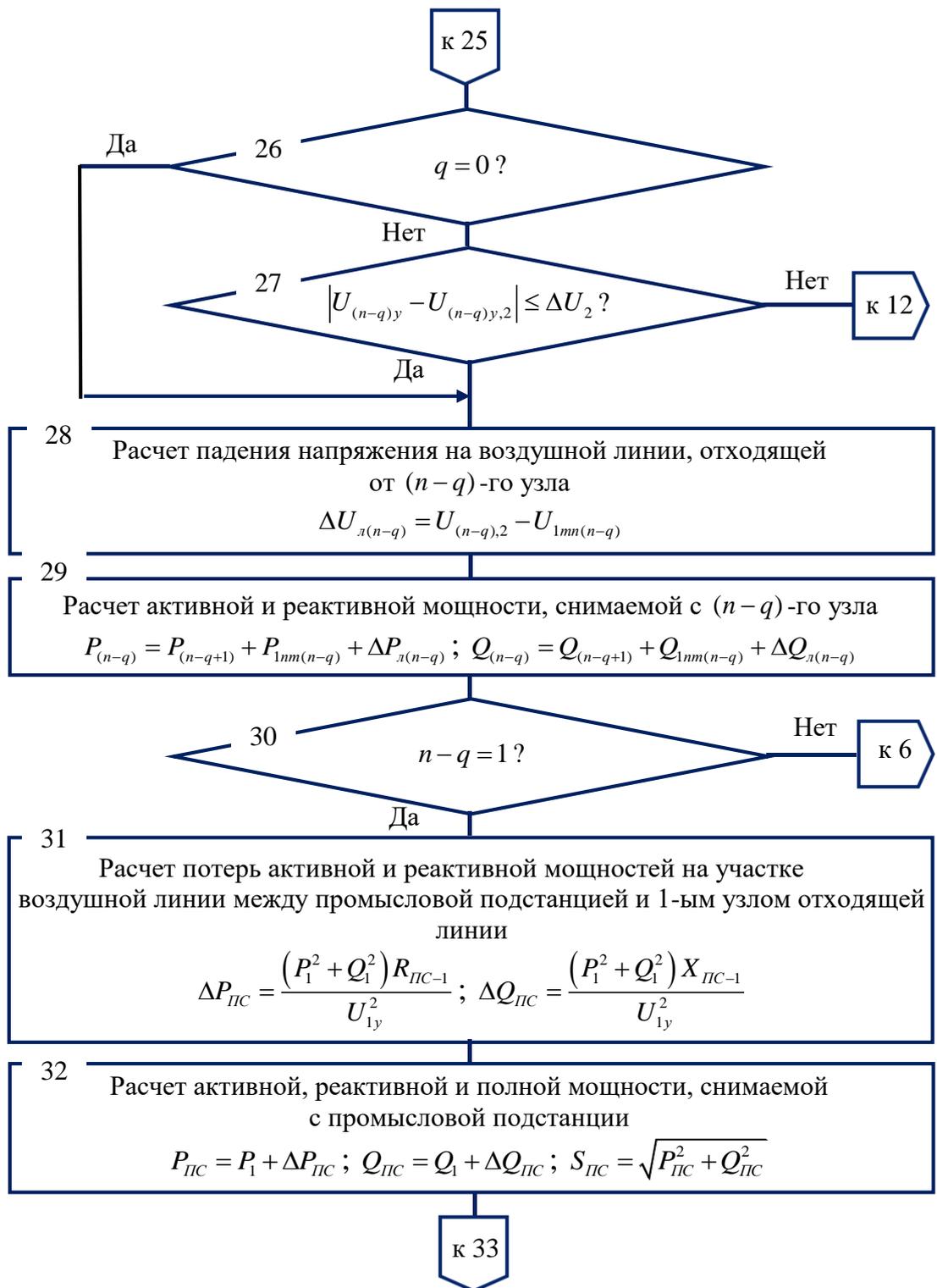
$$\Delta P_{л(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 R_{л(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}; \Delta Q_{л(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 X_{л(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}$$

25

Расчет напряжения на  $(n - q)$ -ом узле отходящей линии

$$U_{(n-q)у,2} = \sqrt{\left( U_{1mn(n-q)} + \frac{P_{1mn(n-q)} R_{л(n-q)} + Q_{1mn(n-q)} X_{л(n-q)}}{U_{1mn(n-q)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{1mn(n-q)} X_{л(n-q)} - Q_{1mn(n-q)} R_{л(n-q)}}{U_{1mn(n-q)}} \right)^2}$$

к 26



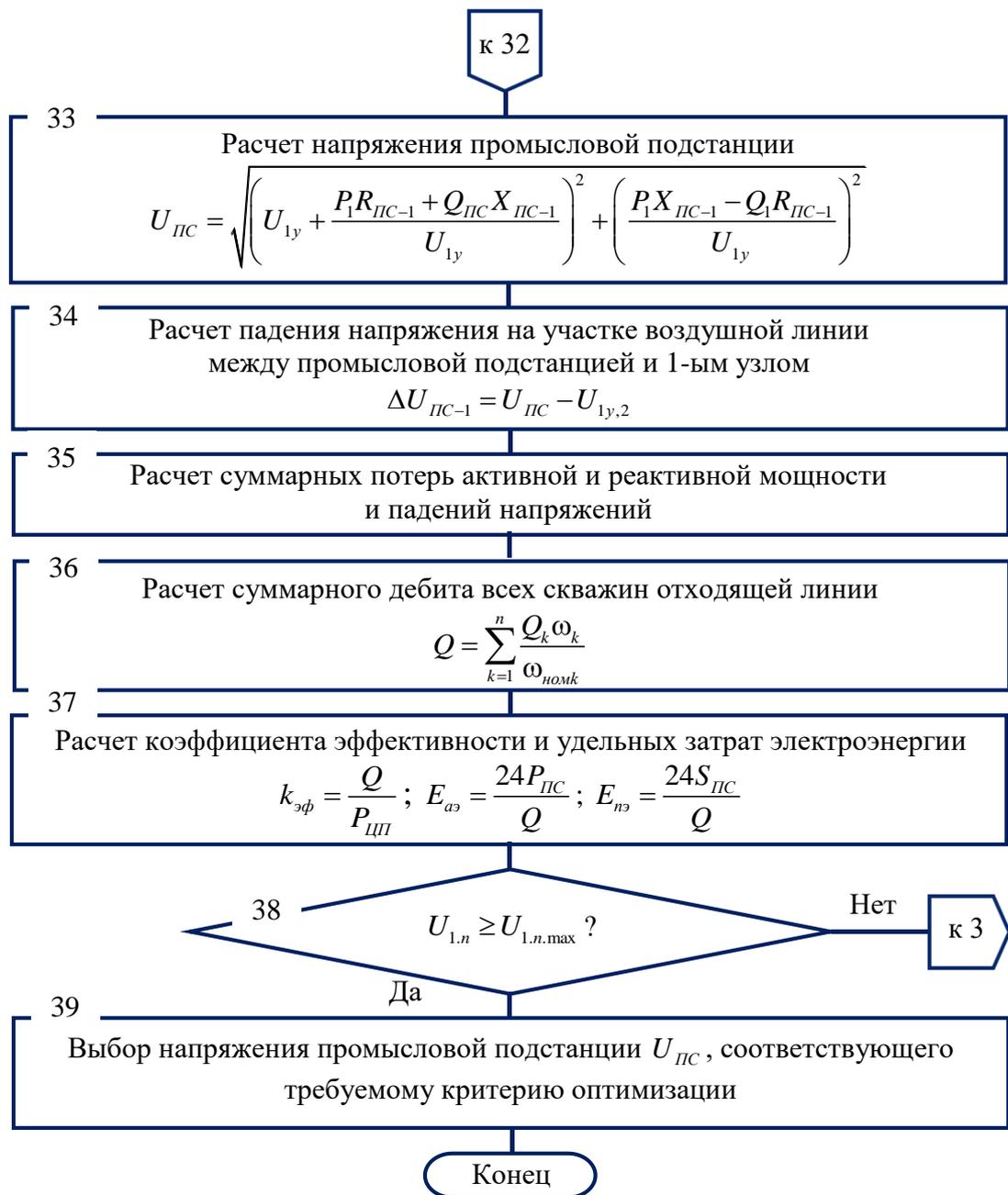


Рисунок 19 – Алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для отходящей линии, содержащей электротехнические комплексы добывающих скважин с ШСНУ

Как и в предыдущем алгоритме во втором блоке присваивается условный номер шага расчетов  $i = -1$ . Затем организуется цикл расчетов с вариацией напряжения на самом удаленном двигателе ШСНУ. В третьем блоке к предыдущему номеру шага расчета прибавляется 1. Поэтому расчет начина-

ется при  $i = 0$ , и в четвертом операторе рассчитывается напряжение на самом удаленном двигателе, подключенном к  $n$ -ому узлу отходящей линии  $U_{1n} = U_{1n.min} + i\Delta U_{step.n}$ .

Затем в пятом блоке переменной  $q$ , с помощью которой организуется цикл расчетов для каждого узла отходящей линии, присваивается значение  $q = -1$ . В шестом блоке к предыдущему значению  $q$  прибавляется 1, то есть  $q$  становится равной 0. Следующий блок производит сравнение величины  $q$  с нулем, и поскольку на первом шаге цикла узлов так оно и есть, то разработанная методика и алгоритм расчета отправляют нас к блоку 14, в котором по формуле (78) рассчитывается скорость вращения  $(n - q)$ -го асинхронного двигателя  $\omega_{(n-q)}$ . Затем в блоке 15 по формуле (79) вычисляется потребление двигателем ШСНУ активной мощности  $P_{AD(n-q)}$ . После этого в блоках 16 и 17 по формулам, аналогичным (31),

$$s_{(n-q)} = \frac{\omega_{0\_50(n-q)} - \omega_{(n-q)}}{\omega_{0\_50(n-q)}}; \quad (121)$$

$$Q_{AD(n-q)} = 3U_{1(n-q)}^2 \left[ \frac{s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}}{R_{2\Gamma(n-q)}^2 + s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}^2} + \frac{U_{1(n-q)}^v}{X_{m(n-q)}} - \frac{1}{X_{ky(n-q)}} \right] \quad (122)$$

рассчитываются фактическое скольжения  $s_{(n-q)}$  и потребление двигателем реактивной мощности  $Q_{AD(n-q)}$ . Затем в блоке 18 определяются значения напряжения  $U_{2nm(n-q)}$  на вторичной обмотке понижающего трансформатора и активной  $P_{2nm(n-q)}$ , реактивной  $Q_{2nm(n-q)}$  и полной  $S_{2nm(n-q)}$  мощности, снимаемой с этой обмотки

$$U_{2nm(n-q)} = \sqrt{3}U_{1(n-q)}; \quad (123)$$

$$P_{2nm(n-q)} = P_{AD(n-q)}; \quad (124)$$

$$Q_{2nm(n-q)} = Q_{AD(n-q)}; \quad (125)$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{AD(n-q)}^2 + Q_{AD(n-q)}^2}. \quad (126)$$

После этого в блоках 19 – 39 производятся те же самые действия, что и в блоках 27 – 47 алгоритма (рисунок 16) определения оптимальной величины

напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию с ЭКДС, оснащенными ПЭД, с организацией тех же циклов расчета. При этом в блоке 39 определяется оптимальное значение напряжения промышленной подстанции, соответствующее требуемому критерию оптимизации.

Воспользуемся разработанным алгоритмом (рисунок 19) и определим с его помощью оптимальное напряжение промышленной подстанции, питающей гипотетическую отходящую линию, к которой подключены три одинаковых штанговых скважинных насосных установок (рисунок 18). Результаты расчета при вариации напряжения на статоре самого удаленного двигателя  $U_{1АДЗ}$  в пределах от  $0,9U_{1АДЗ,ном}$  до  $1,1U_{1АДЗ,ном}$  приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Зависимости параметров энергетической эффективности от напряжения промышленной подстанции для гипотетической отходящей линии с ШСНУ, приведенной на рисунке 18

$\Delta U_3, \%$	-10	-5	-2,5	0	2,5	5	10
$\Delta P, \text{кВт}$	<b>0,42</b>	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,49
$U_{ПС}, \text{В}$	5157	5443	5586	5729	5872	6015	6301
$P_{ПС}, \text{кВт}$	<b>11,43</b>	11,44	11,45	11,46	11,48	11,5	11,52
$Q_{ПС}, \text{кВАр}$	12,9	14,1	14,8	16,4	17,7	18,4	20,0
$Q, \text{м}^3/\text{сут}$	29,040	29,054	29,061	29,069	29,076	29,083	29,098
$k_{эф} = \frac{Q}{P_{ШН}}, \text{м}^3/\text{сут}\cdot\text{кВт}$	<b>2,542</b>	2,539	2,538	2,535	2,532	2,530	2,526
$E_{ас} = \frac{24P_{ПС}}{Q}, \text{кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^3$	<b>9,44</b>	9,45	9,46	9,47	9,48	9,49	9,50
$S_{ПС}, \text{кВА}$	<b>17,2</b>	18,2	18,7	20,0	21,1	21,7	23,1
$E_2 = \frac{24S_{ШН}}{Q}, \text{кВА}\cdot\text{час}/\text{м}^3$	<b>14,24</b>	15,01	15,43	16,52	17,38	17,92	19,05

Данные таблицы 5 показывают, что оптимальным со всех точек зрения является напряжение в центре питания гипотетической отходящей линии равное 5157 В, при котором на самом удаленном асинхронном двигателе обеспечивается фазное напряжение статора – 198 В.



$E_{аз} = \frac{24P_{ПС}}{Q}$ , кВт·час/м <sup>3</sup>	<b>9,405</b>	9,405	9,405	9,405	9,406	9,406	9,406
$S_{ПС}$ , кВА	11,529	11,527	<b>11,526</b>	11,712	11,853	11,871	11,908
$E_2 = \frac{24S_{III}}{Q}$ , кВА·час/м <sup>3</sup>	9,528	9,522	<b>9,518</b>	9,670	9,784	9,796	9,822

### 3.3 Расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с учетом особенностей преобразователей частоты станций управления погружными насосами

Разработанные алгоритмы расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции не учитывают особенностей преобразователей частоты, которые сегодня широко используются в станциях управления погружными насосами. К таким особенностям следует отнести собственный КПД и коэффициент мощности инвертора, возможность стабилизации амплитуды выходного напряжения и компенсация реактивной мощности нагрузки [84]. Кроме того, как отмечалось выше, при работе преобразователя частоты в его выходном напряжении появляются высшие гармоники, которые оказывают влияние на потери в повышающем трансформаторе и погружном электродвигателе, что снижает КПД этих элементов электротехнического комплекса добывающей скважины.

В связи с этим для разработки методики расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, учитывающей свойства преобразователей частоты станций управления и их влияние на работу погружного и наземного оборудования нефтяной скважины, рассмотрим отходящую от промышленной подстанции ПС линию (рисунок 21).

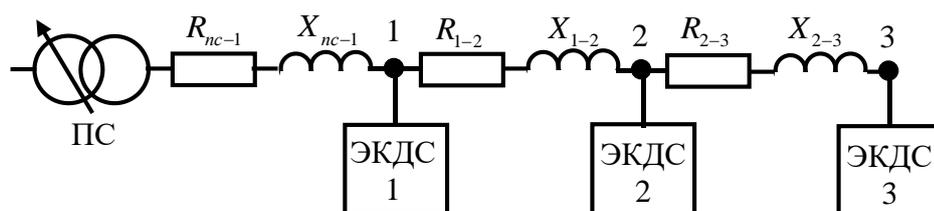


Рисунок 21 – Принципиальная схема гипотетической отходящей линии с тремя ЭКДС

Каждый электротехнический комплекс добывающей скважины содержит воздушную линию, соединяющую узел отходящей линии с понижающим трансформатором ПТ, преобразователь частоты ПЧ, повышающий трансформатор ТМПН, соединительный кабель КЛ и погружной асинхронный двигатель М, приводящий в движение центробежный насос (рисунок 22) [75].

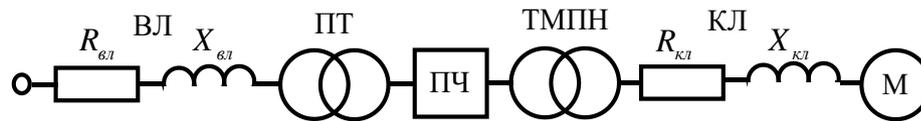


Рисунок 22 – Схема ЭКДС погружного центробежного насоса с преобразователем частоты в станции управления

Будем считать, что в каждом электротехническом комплексе скважины используются погружные электродвигатели ЭДТ45-103М1, приводящие в движение центробежные насосы 0215ЭЦНАКИ5-125И, технические характеристики которых были приведены выше. Для питания ПЭД нестандартным напряжением установлены повышающие трансформаторы ТМПН номинальной мощностью 100 кВА, а для сопряжения с воздушной линией электропередач в каждом ЭКДС применен понижающий трансформатор 6/0,4 кВ с номинальной мощностью 100 кВА, технические параметры которых приведены в разделе 3.1.

Соединительные кабели, с помощью которых погружные двигатели подключены к повышающим трансформаторам, имеют активное сопротивление  $R_{кл1} = R_{кл2} = R_{кл3} = 1,191$  Ом и реактивное сопротивление  $X_{кл1} = X_{кл2} = X_{кл3} = 0,126$  Ом. Сопротивления воздушных линий, соединяющих понижающие трансформаторы с узлами отходящей линии, имеют следующие значения:  $R_{л1} = R_{л2} = R_{л3} = 0,92$  Ом,  $X_{л1} = X_{л2} = X_{л3} = 0,77$  Ом. Участки отходящей линии между узлами характеризуются сопротивлениями:  $R_{ПС-1} = 1,02$  Ом;  $X_{ПС-1} = 0,85$  Ом;  $R_{1-2} = 1,224$  Ом;  $X_{1-2} = 1,202$  Ом;  $R_{2-3} = 0,612$  Ом;  $X_{2-3} = 0,51$  Ом.

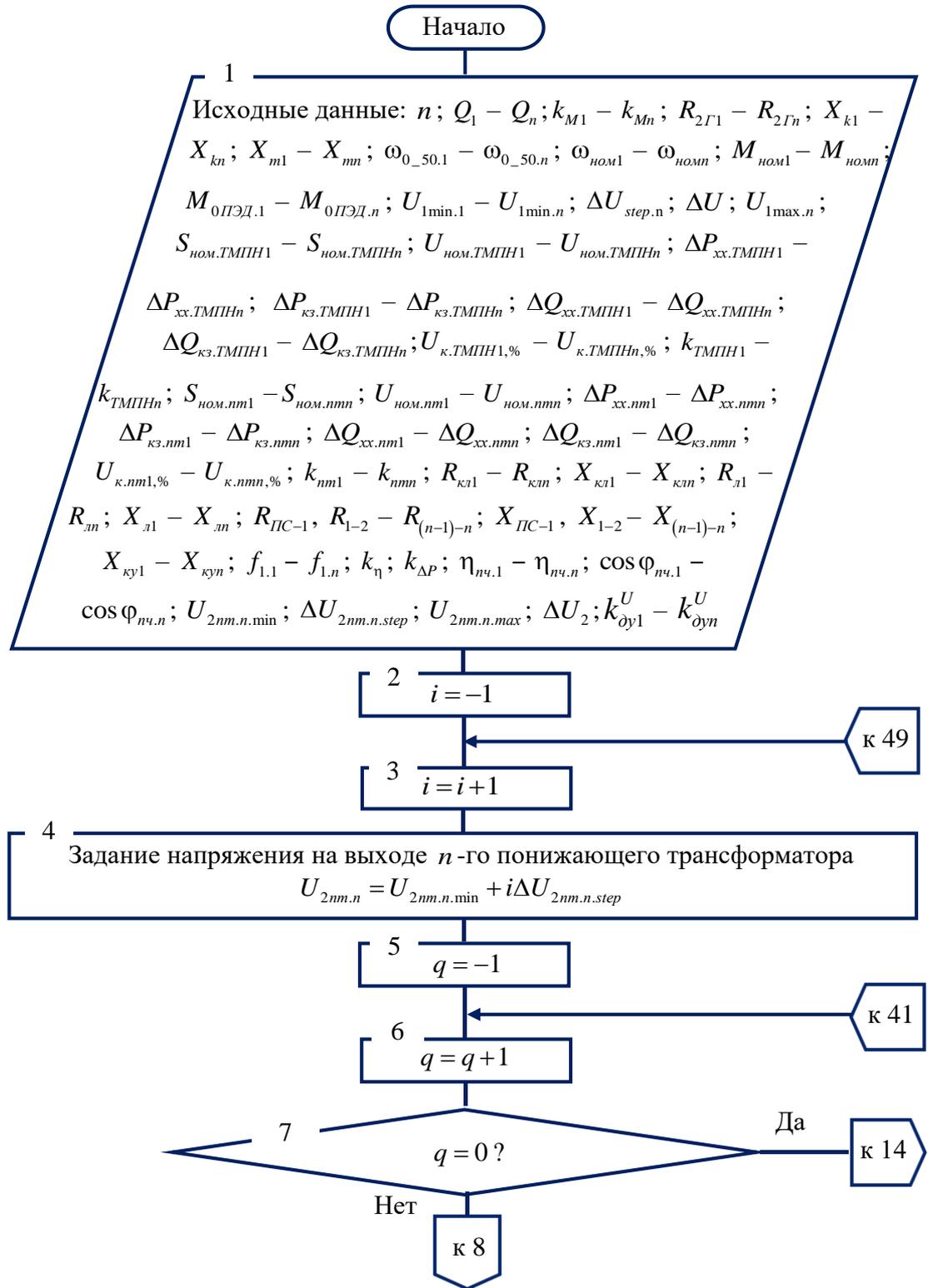
Каждая скважина характеризуется дебитом и соответствующей производительностью  $Q_{нас} = 87 \text{ м}^3/\text{сутки}$ . В связи с тем, что преобразователь частоты обеспечивает работу насоса с максимальным КПД  $\eta_{нас} = 0,53$  при скорости вращения  $\omega = 215,5 \text{ рад/с}$  при частоте питающего напряжения  $f_1 = 36,25 \text{ Гц}$ , коэффициент  $k_M$  становится равным  $k_M = 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ Нмс}^2/\text{рад}^2$ .

Предлагается для поиска оптимального значения напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию с ЭКДС с преобразователями частоты, производить вариацию напряжения на вторичной обмотке понижающего трансформатора самой удаленной скважины в пределах от  $0,9U_{1ном}$  до  $1,1U_{1ном}$  с некоторым шагом  $\Delta U_{2nm.n.step}$ . Это связано с функциональной возможностью преобразователя частоты стабилизировать напряжение на выходе, что приводит к неизменности напряжения на статоре погружного двигателя при вариации напряжения на входе станции управления. Тогда методику расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для рассматриваемой отходящей линии, содержащей электротехнические комплексы добывающих скважин с погружными центробежными насосами, можно представить в виде следующего алгоритма (рисунок 23).

Исходные данные для расчета практически совпадают с данными, используемыми в алгоритме, приведенном на рисунке 16, только добавляются значения частот напряжения, формируемых преобразователями  $f_{1.1} - f_{1.n}$ , КПД  $\eta_{nc.1} - \eta_{nc.n}$  и коэффициенты мощности преобразователей  $\cos \varphi_{nc.1} - \cos \varphi_{nc.n}$  и коэффициенты  $k_\eta$  и  $k_{\Delta P}$ , учитывающие изменения КПД асинхронного двигателя и потерь в повышающем трансформаторе от действия высших гармоник. Отличительной особенностью является также задание минимального  $U_{2nm.n.min}$  и максимального  $U_{2nm.n.max}$  значений напряжений на выходе самого удаленного понижающего трансформатора и шага приращения  $\Delta U_{2nm.n.step}$ .

В блоках 2 – 13 происходят практически те же самые действия, что и для расчета оптимального напряжения для отходящей линии, питающие ПЭД без преобразователей частоты. Отличительной особенностью является то, что

в блоках 4 и 13 задаются напряжения на выходе соответствующих понижающих трансформаторов, а не напряжения на статорах ПЭД.



к 7

8

Расчет потерь активной и реактивной мощности на воздушной линии, соединяющей  $(n - q)$ -ый узел с  $(n - q + 1)$ -ым

$$\Delta P_{л(n-q),(n-q+1)} = \frac{(P_{(n-q+1)}^2 + Q_{(n-q+1)}^2) R_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}^2};$$

$$\Delta Q_{л(n-q),(n-q+1)} = \frac{(P_{(n-q+1)}^2 + Q_{(n-q+1)}^2) X_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}^2}$$

9

Расчет активной и реактивной мощности, снимаемой с  $(n - q)$ -го узла отходящей линии с учетом потребляемой мощности предыдущим узлом

$$P_{(n-q),(n-q+1)} = P_{(n-q+1)} + \Delta P_{л(n-q),(n-q+1)}; \quad Q_{(n-q),(n-q+1)} = Q_{(n-q+1)} + \Delta Q_{л(n-q),(n-q+1)}$$

10

Расчет напряжения на  $(n - q)$ -ом узле отходящей линии

$$U_{(n-q)y} = \sqrt{\left( U_{(n-q+1)} + \frac{P_{(n-q+1)} R_{л(n-q),(n-q+1)} + Q_{(n-q+1)} X_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{(n-q+1)} X_{л(n-q),(n-q+1)} - Q_{(n-q+1)} R_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}} \right)^2}$$

11

 $m = -1$ 

к 38

12

 $m = m + 1$ 

13

Задание напряжения на выходе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора  $U_{2nm(n-q)} = U_{2nm(n-q).min} + m\Delta U$

к 7

к 14

к 13

14

Расчет скорости вращения вала  $(n - q)$ -го двигателя

$$\omega_{(n-q)} = -\frac{M_{ном(n-q)}}{2k_{M(n-q)}d_{1(n-q)}} + \sqrt{\frac{M_{ном(n-q)}^2}{4k_{M(n-q)}^2d_{1(n-q)}^2} + \frac{2\pi f_{1(n-q)}M_{ном(n-q)}}{k_{M(n-q)}d_{1(n-q)}Z_{n(n-q)}} - \frac{M_{0ПЭД(n-q)}}{k_{M(n-q)}}},$$

$$\text{где } d_{1(n-q)} = \omega_{0_{-50}(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1} (U_{1(n-q).f} - U_{1(n-q)})$$

15

Расчет активной мощности, потребляемой  $(n - q)$ -ым двигателем

$$P_{ПЭД(n-q)} = \frac{k_{M(n-q)}\omega_{(n-q)}^3 + M_{0ПЭД(n-q)}\omega_{(n-q)}}{k_{\eta}\eta_{(n-q)}}$$

16

Расчет скольжения ротора  $(n - q)$ -ого двигателя

$$s_{(n-q)} = \frac{2\pi f_{1(n-q)} - Z_{n(n-q)}\omega_{(n-q)}}{2\pi f_{1(n-q)}}$$

17

Расчет реактивной мощности, потребляемой  $(n - q)$ -ым двигателем

$$Q_{ПЭД(n-q)} = 3 \left[ \frac{U_{1(n-q)}^2 s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)} \frac{f_{1(n-q)}}{50}}{R_{2\Gamma(n-q)}^2 + s_{(n-q)}^2 \left( X_{k(n-q)} \frac{f_{1(n-q)}}{50} \right)^2} + \frac{U_{1(n-q)}^2}{X_{m(n-q)} \frac{f_{1(n-q)}}{50}} - \frac{U_{1(n-q)}^2}{X_{ky(n-q)} \frac{f_{1(n-q)}}{50}} \right]$$

18

Расчет потерь активной и реактивной мощности на соединительном кабеле  $(n - q)$ -го ПЭД

$$\Delta P_{кл(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2) R_{кл(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}; \quad \Delta Q_{кл(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2) X_{кл(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}$$

19

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на выходе  $(n - q)$ -го ТМПН  $P_{ТМПН(n-q)} = P_{ПЭД(n-q)} + \Delta P_{кл(n-q)}$ ;

$$Q_{ТМПН(n-q)} = Q_{ПЭД(n-q)} + \Delta Q_{кл(n-q)}; \quad S_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{P_{ТМПН(n-q)}^2 + Q_{ТМПН(n-q)}^2}$$

к 20

к 19

20

Расчет напряжения на выходе  $(n - q)$ -го ТМПН

$$U_{\text{ТМПН}(n-q)} = \sqrt{\left( \sqrt{3}U_{1(n-q)} + \frac{P_{\text{ПЭД}(n-q)} R_{\text{кл}(n-q)} + Q_{\text{ПЭД}(n-q)} X_{\text{кл}(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{\text{ПЭД}(n-q)} X_{\text{кл}(n-q)} - Q_{\text{ПЭД}(n-q)} R_{\text{кл}(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2}$$

21

Расчет падения напряжения на соединительном кабеле

$$(n - q)\text{-го ПЭД} \quad \Delta U_{\text{кл}(n-q)} = U_{\text{ТМПН}(n-q)} - \sqrt{3}U_{1(n-q)}$$

22

Расчет коэффициента загрузки  $(n - q)$ -ого ТМПН

$$\beta_{\text{ТМПН}(n-q)} = \frac{S_{\text{ТМПН}(n-q)}}{10^3 S_{\text{ном.ТМПН}(n-q)}}$$

23

Расчет потерь активной, реактивной и полной мощности на  $(n - q)$ -ом ТМПН

$$\Delta P_{\text{ТМПН}(n-q)} = 10^3 \left( \Delta P_{\text{xx.ТМПН}(n-q)} + \beta_{\text{ТМПН}(n-q)}^2 \Delta P_{\text{кз.ТМПН}(n-q)} \right) k_{\Delta P};$$

$$\Delta Q_{\text{ТМПН}(n-q)} = 10^3 \left( \Delta Q_{\text{xx.ТМПН}(n-q)} + \beta_{\text{ТМПН}(n-q)}^2 \Delta Q_{\text{кз.ТМПН}(n-q)} \right);$$

$$\Delta S_{\text{ТМПН}(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{\text{ТМПН}(n-q)}^2 + \Delta Q_{\text{ТМПН}(n-q)}^2}$$

24

Расчет потерь напряжения на  $(n - q)$ -ом ТМПН

$$\Delta U_{\text{ТМПН}(n-q)} = \frac{k_{\text{ТМПН}(n-q)}^2 \left[ R_{\text{ТМПН}(n-q)} P_{\text{ТМПН}(n-q)} + X_{\text{ТМПН}(n-q)} Q_{\text{ТМПН}(n-q)} \right]}{U_{\text{ТМПН}(n-q)}},$$

$$\text{где } R_{\text{ТМПН}(n-q)} = \frac{10^3 \Delta P_{\text{кз.ТМПН}(n-q)} U_{\text{ном.ТМПН}(n-q)}^2}{S_{\text{ном.ТМПН}(n-q)}^2};$$

$$X_{\text{ТМПН}(n-q)} = 10 U_{\text{к.ТМПН}(n-q),\%} \frac{U_{\text{ном.ТМПН}(n-q)}^2}{S_{\text{ном.ТМПН}(n-q)}}$$

к 25

к 24

25

Расчет напряжения на выходе  $(n - q)$ -го преобразователя частоты

$$U_{ПЧ(n-q)} = k_{ТМПН(n-q)} U_{ТМПН(n-q)} + \Delta U_{ТМПН(n-q)}$$

26

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на выходе  $(n - q)$ -го преобразователя частоты

$$P_{ПЧ(n-q)} = P_{ТМПН(n-q)} + \Delta P_{ТМПН(n-q)}; \quad Q_{ПЧ(n-q)} = Q_{ТМПН(n-q)} + \Delta Q_{ТМПН(n-q)};$$

$$S_{ПЧ(n-q)} = \sqrt{P_{ПЧ(n-q)}^2 + Q_{ПЧ(n-q)}^2}$$

27

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на выходе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$P_{2nm(n-q)} = \frac{P_{ПЧ(n-q)}}{\eta_{ПЧ(n-q)}}; \quad Q_{2nm(n-q)} = \frac{P_{ПЧ(n-q)} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{ПЧ(n-q)}}}{\cos \varphi_{ПЧ(n-q)}};$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{2nm(n-q)}^2 + Q_{2nm(n-q)}^2}$$

28

Расчет потерь активной и реактивной и мощности на  $(n - q)$ -ом преобразователе частоты

$$\Delta P_{ПЧ(n-q)} = P_{2nm(n-q)} - P_{ПЧ(n-q)}; \quad \Delta Q_{ПЧ(n-q)} = Q_{2nm(n-q)} - Q_{ПЧ(n-q)}$$

29

Расчет падения напряжения на  $(n - q)$ -ом преобразователе частоты

$$\Delta U_{ПЧ(n-q)} = U_{2nm(n-q)} - U_{ПЧ(n-q)}$$

30

Расчет коэффициента загрузки  $(n - q)$ -ого понижающего трансформатора

$$\beta_{nm(n-q)} = \frac{S_{2nm(n-q)}}{10^3 S_{ном. nm(n-q)}}$$

к 31

к 30

- 31 Расчет потерь активной, реактивной и полной мощности на  $(n - q)$ -ом понижающем трансформаторе

$$\Delta P_{nm(n-q)} = 10^3 \left( \Delta P_{xx.nm(n-q)} + \beta_{nm(n-q)}^2 \Delta P_{кз.nm(n-q)} \right);$$

$$\Delta Q_{nm(n-q)} = 10^3 \left( \Delta Q_{xx.nm(n-q)} + \beta_{nm(n-q)}^2 \Delta Q_{кз.nm(n-q)} \right); \Delta S_{nm(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{nm(n-q)}^2 + \Delta Q_{nm(n-q)}^2}$$

- 32 Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на входе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$P_{1nm(n-q)} = P_{2mn(n-q)} + \Delta P_{mn(n-q)}; Q_{1nm(n-q)} = Q_{2mn(n-q)} + \Delta Q_{mn(n-q)};$$

$$S_{1nm(n-q)} = \sqrt{P_{1nm(n-q)}^2 + Q_{1nm(n-q)}^2}$$

- 33 Расчет потерь напряжения на  $(n - q)$ -ом понижающем трансформаторе

$$\Delta U_{nm(n-q)} = \frac{R_{nm(n-q)} P_{nm(n-q)} + X_{nm(n-q)} Q_{nm(n-q)}}{k_{nm(n-q)}^2 U_{nm(n-q)}}$$

- 34 Расчет напряжения на входе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора  $U_{1nm(n-q)} = U_{2mn(n-q)} k_{mn(n-q)} + \Delta U_{mn(n-q)}$

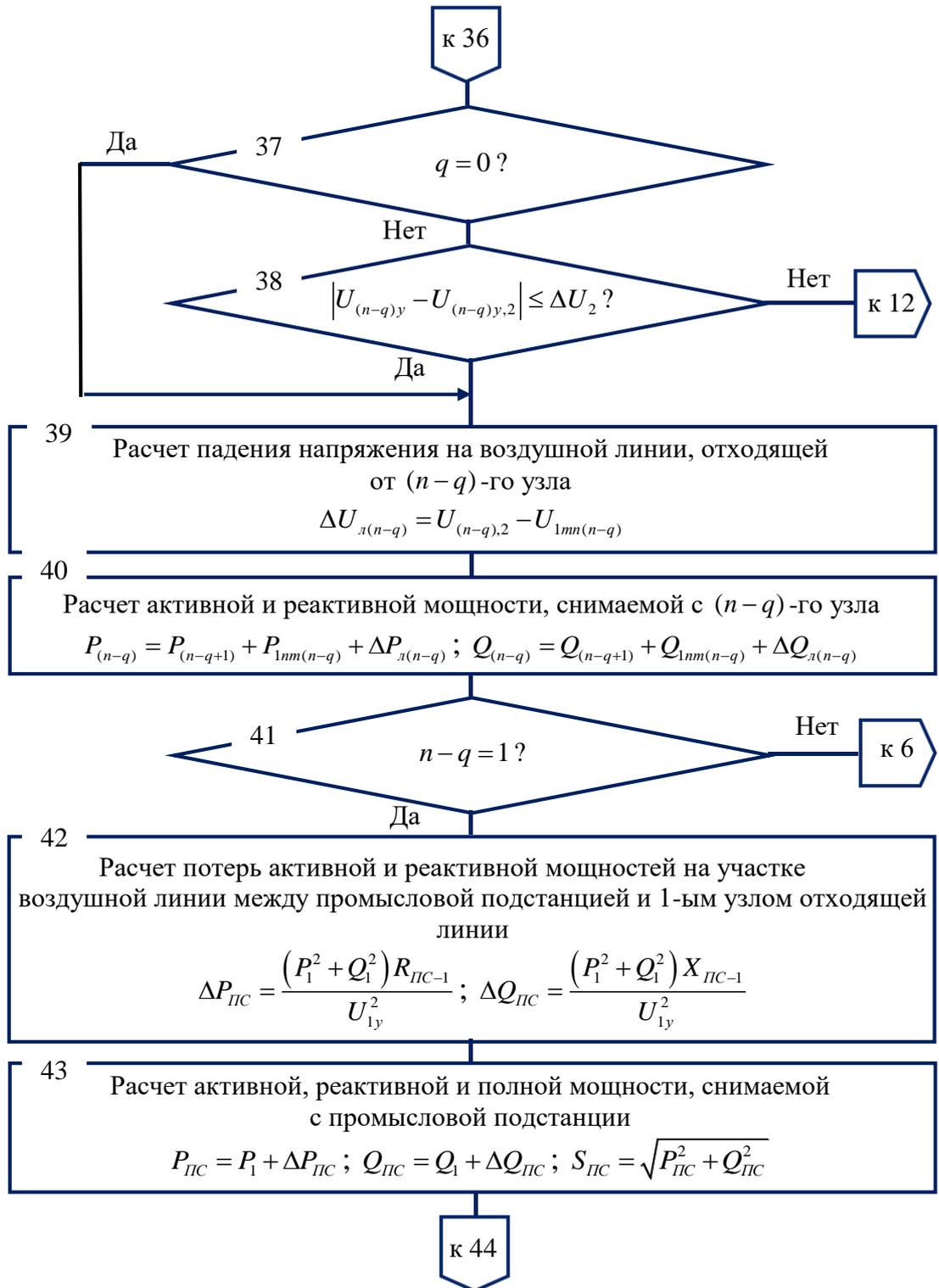
- 35 Расчет потерь активной и реактивной мощности на воздушной линии, отходящей от  $(n - q)$ -го узла

$$\Delta P_{л(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 R_{л(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}; \Delta Q_{л(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 X_{л(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}$$

- 36 Расчет напряжения на  $(n - q)$ -ом узле отходящей линии

$$U_{(n-q)у,2} = \sqrt{\left( U_{1mn(n-q)} + \frac{P_{1mn(n-q)} R_{л(n-q)} + Q_{1mn(n-q)} X_{л(n-q)}}{U_{1mn(n-q)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{1mn(n-q)} X_{л(n-q)} - Q_{1mn(n-q)} R_{л(n-q)}}{U_{1mn(n-q)}} \right)^2}$$

к 37



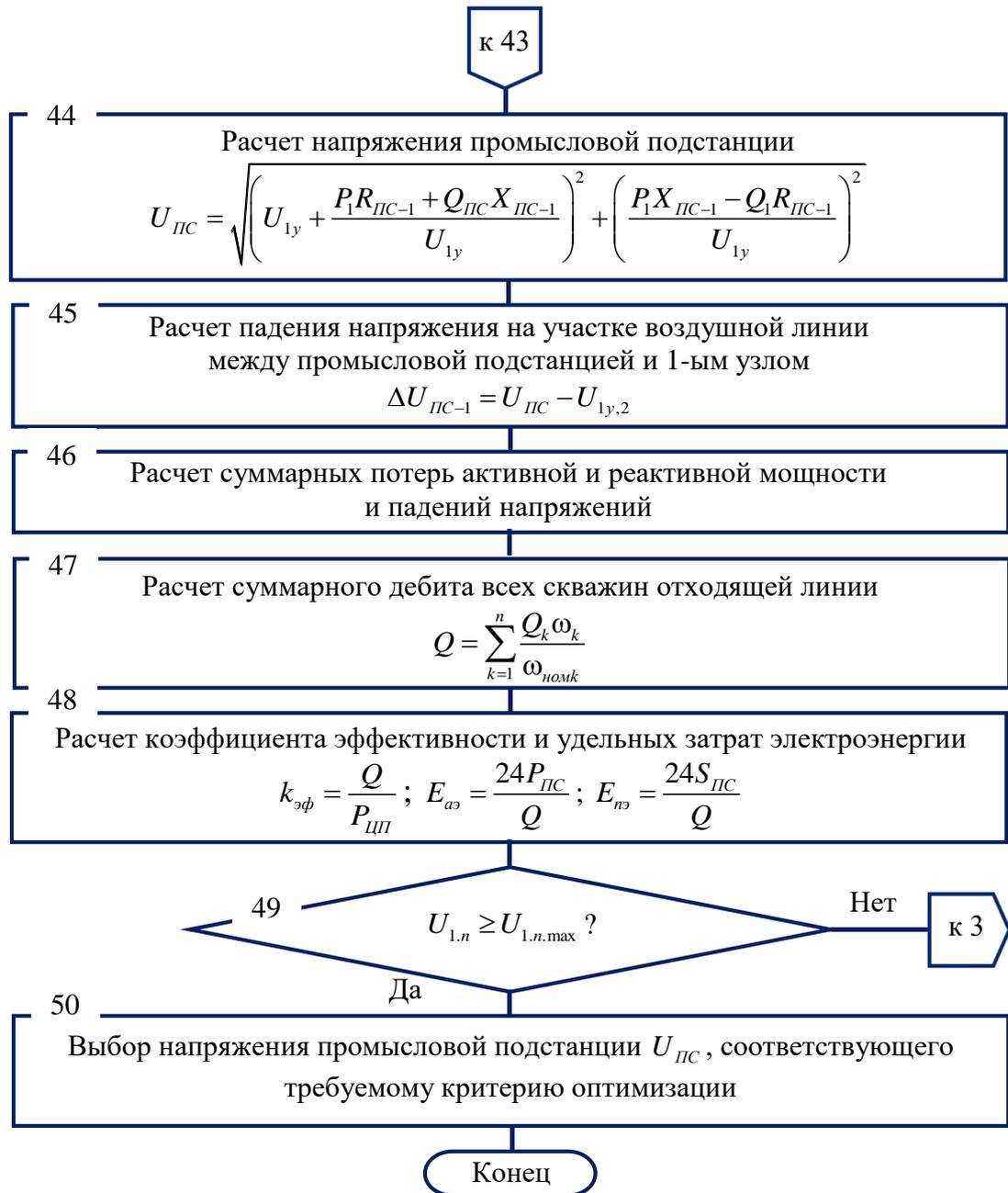


Рисунок 23 – Алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для отходящей линии, содержащей электротехнические комплексы добывающих скважин с погружными центробежными насосами и частотными преобразователями в станциях управления

Далее в блоках 14 – 18 по формулам (76), (77), (50) – (52) рассчитываются скорость вращения  $(n - q)$ -го ПЭД  $\omega_{(n-q)}$ ; фактическое скольжения  $s_{(n-q)}$ ; потребление двигателем активной  $P_{ПЭД(n-q)}$  и реактивной  $Q_{ПЭД(n-q)}$

мощности; потери мощности  $\Delta P_{кл(n-q)}$  и  $\Delta Q_{кл(n-q)}$  на соединительном кабеле. Затем в блоках 19 – 24 производятся те же вычисления, что и в алгоритме, представленном на рисунке 16. Отличительной особенностью является то, что потери активной мощности в повышающем трансформаторе рассчитываются по формуле (56).

После этого в блоках 25 – 29 по формулам

$$U_{ПЧ(n-q)} = k_{ТМПИ(n-q)} U_{ТМПИ(n-q)} + \Delta U_{ТМПИ(n-q)}; \quad (127)$$

$$P_{ПЧ(n-q)} = P_{ТМПИ(n-q)} + \Delta P_{ТМПИ(n-q)}; \quad (128)$$

$$Q_{ПЧ(n-q)} = Q_{ТМПИ(n-q)} + \Delta Q_{ТМПИ(n-q)}; \quad (129)$$

$$S_{ПЧ(n-q)} = \sqrt{P_{ПЧ(n-q)}^2 + Q_{ПЧ(n-q)}^2}; \quad (130)$$

$$P_{2nm(n-q)} = \frac{P_{ПЧ(n-q)}}{\eta_{ПЧ(n-q)}}; \quad (131)$$

$$Q_{2nm(n-q)} = \frac{P_{ПЧ(n-q)} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{ПЧ(n-q)}}}{\cos \varphi_{ПЧ(n-q)}}; \quad (132)$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{2nm(n-q)}^2 + Q_{2nm(n-q)}^2}; \quad (133)$$

$$\Delta P_{ПЧ(n-q)} = P_{2nm(n-q)} - P_{ПЧ(n-q)}; \quad (134)$$

$$\Delta Q_{ПЧ(n-q)} = Q_{2nm(n-q)} - Q_{ПЧ(n-q)}; \quad (135)$$

$$\Delta U_{ПЧ(n-q)} = U_{2nm(n-q)} - U_{ПЧ(n-q)} \quad (136)$$

последовательно рассчитываются напряжение  $U_{ПЧ(n-q)}$ , активная  $P_{ПЧ(n-q)}$ , реактивная  $Q_{ПЧ(n-q)}$  и полная  $S_{ПЧ(n-q)}$  мощность на выходе преобразователя частоты, активная  $P_{2nm(n-q)}$ , реактивная  $Q_{2nm(n-q)}$  и полная  $S_{2nm(n-q)}$  мощность снимаемая со вторичной обмотки понижающего трансформатора и потери мощности  $\Delta P_{ПЧ(n-q)}$ ,  $\Delta Q_{ПЧ(n-q)}$  и падение напряжения  $\Delta U_{ПЧ(n-q)}$  на преобразователе частоты.

Затем в блоках 30 – 50 производятся те же действия и вычисления, что и в блоках 27 – 47 алгоритма, приведенного на рисунке 16, и описанные выше. В результате получается алгоритм, имеющий внешний цикл перебора

значений напряжения на вторичной обмотке понижающего трансформатора самого удаленного электротехнического комплекса добывающей скважины и внутренние циклы перебора узлов и напряжений на выходе других понижающих трансформаторов.

Применим разработанный алгоритм для определения оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, питающей гипотетическую отходящую линию, приведенную на рисунках 21 и 22. Результаты расчета при вариации напряжения понижающего трансформатора  $U_{2пт.3}$  в пределах от  $0,9U_{2пт.3.ном}$  до  $1,1U_{2пт.3.ном}$  представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Зависимости параметров энергетической эффективности от напряжения промышленной подстанции для гипотетической отходящей линии, приведенной на рисунках 21 и 22

$\Delta U_{2пт.3}, \%$	-10	-5	-2,5	0	2,5	5	10
$\Delta P, \text{кВт}$	9,99	9,95	9,93	9,91	9,90	9,88	<b>9,85</b>
$U_{ПС}, \text{В}$	5446	5743	5892	6041	6190	6339	6637
$P_{ПС}, \text{кВт}$	79,70	79,66	79,64	79,62	79,61	79,59	<b>79,57</b>
$Q_{ПС}, \text{кВАр}$	31,30	31,27	31,25	31,23	31,22	31,21	31,18
$Q, \text{м}^3/\text{сут}$	264,74	264,74	264,74	264,74	264,74	264,74	264,74
$k_{эф} = \frac{Q}{P_{ПС}}, \text{м}^3/\text{сут} \cdot \text{кВт}$	3,322	3,323	3,324	3,325	3,326	3,326	<b>3,327</b>
$E_{ав} = \frac{24P_{ПС}}{Q}, \text{кВт} \cdot \text{час}/\text{м}^3$	7,225	7,222	7,22	7,218	7,217	7,215	<b>7,213</b>
$S_{ПС}, \text{кВА}$	85,63	85,58	85,55	85,53	85,51	85,49	<b>85,46</b>
$E_{нс} = \frac{24S_{ПС}}{Q}, \text{кВА} \cdot \text{час}/\text{м}^3$	7,763	7,758	7,756	7,754	7,752	7,750	<b>7,747</b>

Они показывают, что оптимальным по всем критериям является напряжение промышленной подстанции  $U_{ПС} = 6637 \text{ В}$ . При этом суммарное потребление активной мощности от промышленной подстанции равно  $P_{ПС} = 79,57 \text{ кВт}$ , что в 1,92 раза меньше, чем в случае, когда станции управления не имеют в своем составе преобразователей частоты (см. таблицу 3), хотя рассмотрены одинаковые скважины с идентичными параметрами. По-

требление же полной мощности уменьшается в 2,32 раза, поскольку преобразователи частоты компенсируют реактивную мощность, потребляемую ПЭД, соединительными кабелями и повышающими трансформаторами. Это является дополнительным аргументом для применения преобразователей частоты в станциях управления погружными насосами.

### 3.4 Универсальная методика и алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции

Проведенные исследования и расчеты позволяют сформулировать универсальную методику определения оптимального напряжения промышленной подстанции, удовлетворяющего любому критерию оптимизации с учетом особенностей напорных характеристик погружных насосов и преобразователей частоты. Предположим, что отходящая линия нефтяного промысла, например, питающая электротехнический комплекс добывающих скважин, является неразветвленной и содержит  $n$  узлов (рисунок 24).

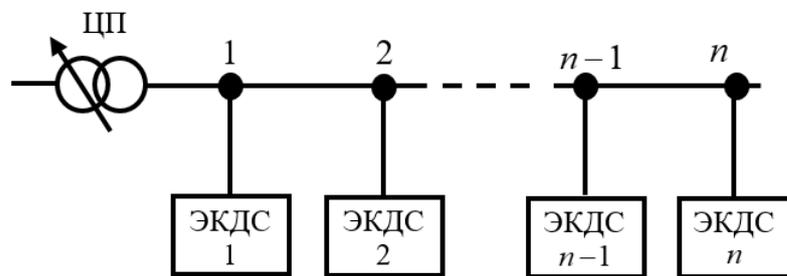


Рисунок 24 – Неразветвленная отходящая линия электротехнического комплекса добывающих скважин с произвольным числом узлов

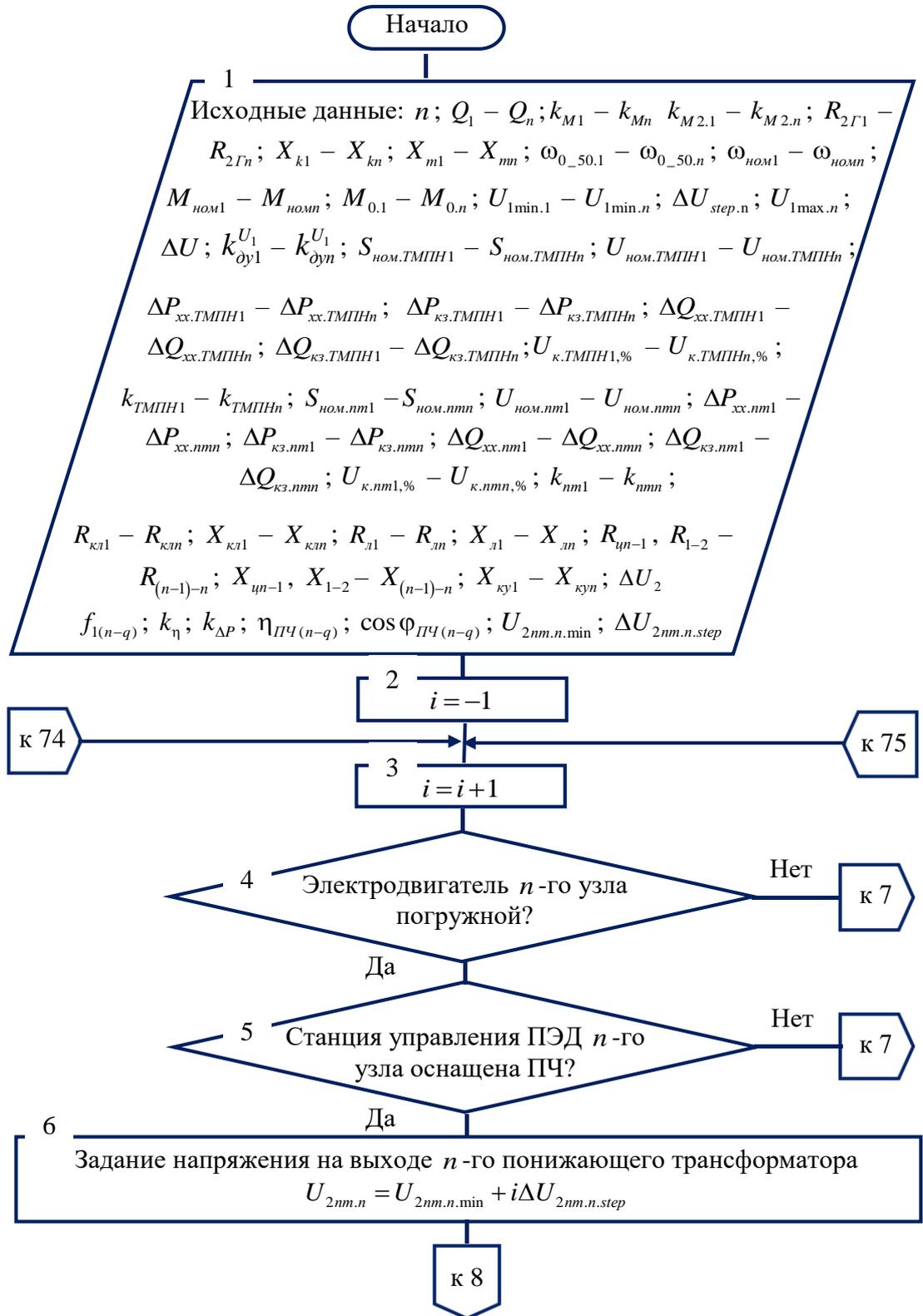
Электротехнические комплексы добывающих скважин ЭКДС1–ЭКДС $n$  могут содержать центробежные или винтовые насосы с погружными электродвигателями, так и штанговые скважинные насосные установки, приводимые в движения обычными асинхронными двигателями. Следует отметить, что зависимости, полученные для расчета (прогнозирования) скорости асинхронных двигателей ШСНУ с цепным приводом, справедливы и для станков-качалок.

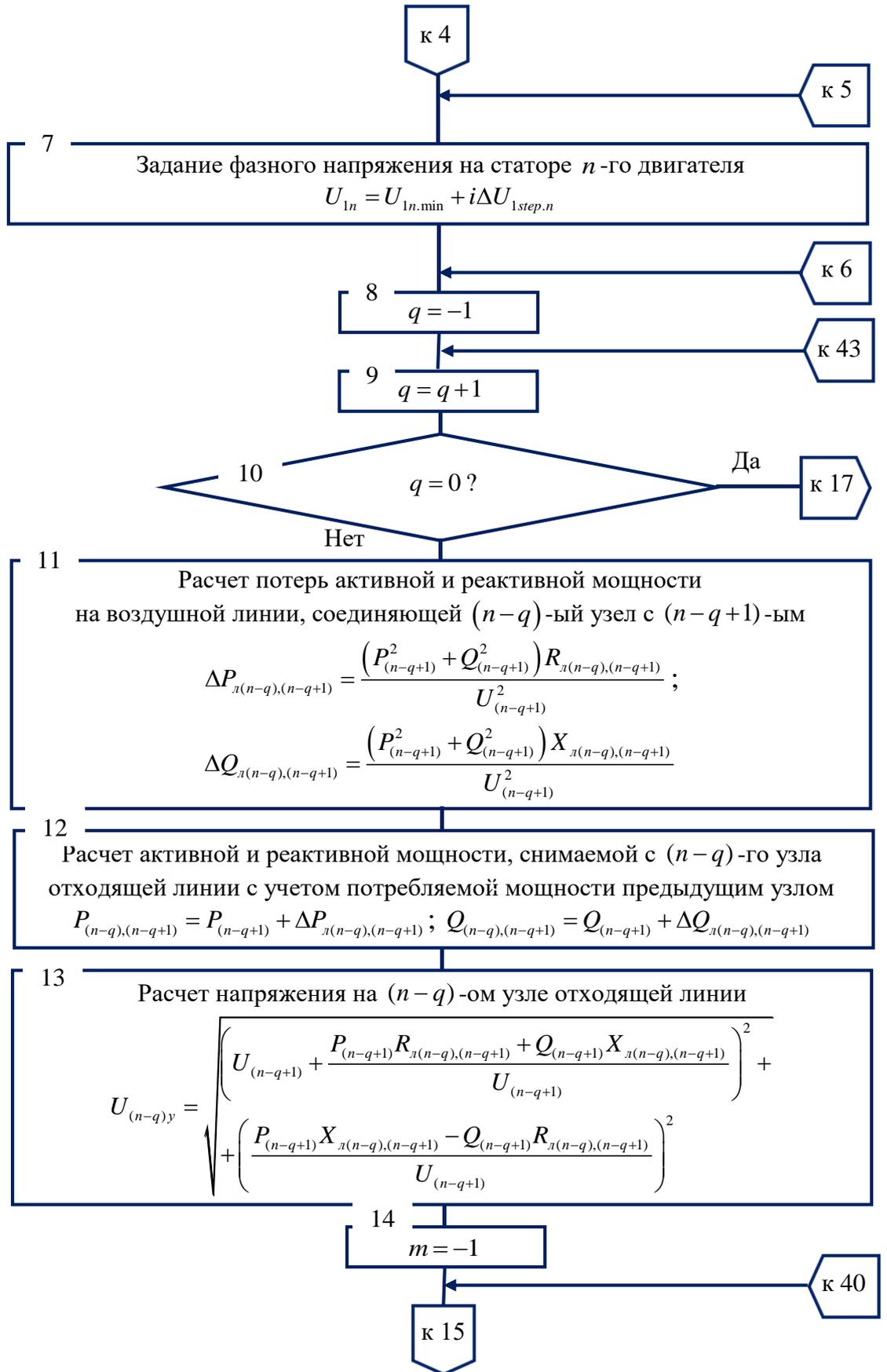
Поскольку глобально выделяются два типа погружных насосов с характерными механическими характеристиками, то разработанная методика расчета оптимального напряжения центра питания отходящей линии учитывает эту особенность. Также методика учитывает характеристики преобразователей частоты и их влияние на потери в других элементах питающей сети. Методика представляет собой определенную последовательность вычислительных процедур, которую удобно представить в виде алгоритма (рисунок 25).

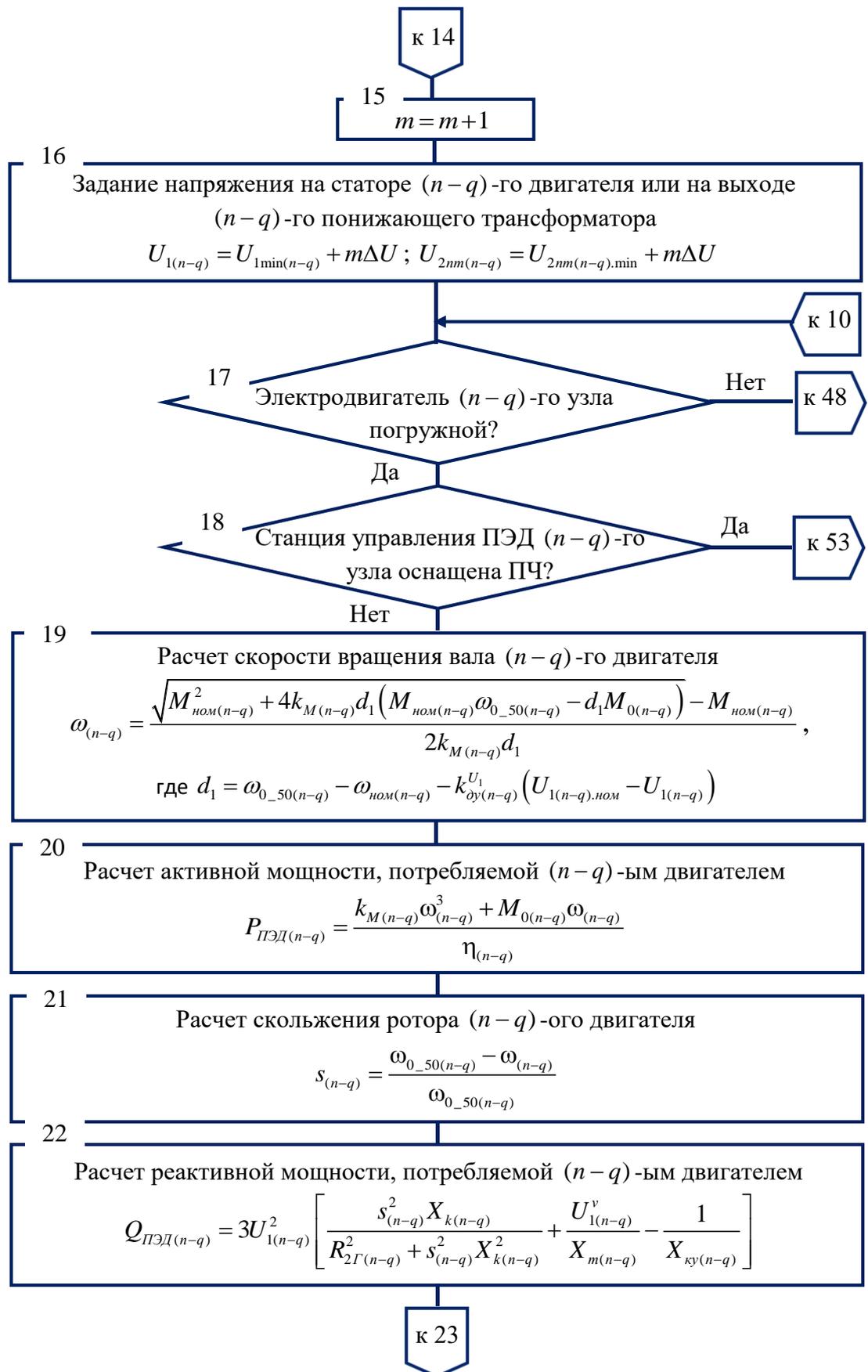
Алгоритм представляет собой совокупность алгоритмов, разработанных и рассмотренных выше и интегрированных в единое целое. В связи с этим исходными данными для расчета являются все параметры элементов ЭКДС и погружных насосов.

В цикле перебора напряжений ЭКДС самого удаленного узла  $n$  в блоке 4 анализируется, является ли двигатель погружного насоса погружным. Если да, то алгоритм отправляет нас в блок 5, в котором определяется оснащена ли станция управления преобразователем частоты. В случае наличия преобразователя частоты алгоритм переходит в блок 6, в котором задается напряжение на выходе  $n$ -го понижающего трансформатора  $U_{2nm,n}$ . Далее алгоритм переходит в блок 8. Если в блоках 4 и 5 получается отрицательный ответ, то в блоке 7 задается фазное напряжение на статоре самого удаленного  $n$ -го двигателя  $U_{1n}$ , и далее действие алгоритма переходит в блок 8, после которого начинается цикл перебора узлов. Если узел самый дальний, то в блоках 17 и 18 производится такой же анализ, как и в блоках 4 и 5, и в зависимости от типа двигателя и наличия преобразователя частоты в станции управления действия алгоритма переходят на соответствующее ответвление со специфическими вычислениями, подробно рассмотренными выше. Все веточки алгоритма сходятся в блоке 32, в котором начинается общая часть расчетов (вплоть до блока 71) независимо от типа двигателя и станции управления погружным насосом, связанная с определением потерь мощности на понижаю-

щих трансформаторах и воздушных линиях, а также напряжения и потребляемой мощности от промышленной подстанции.







к 22

23

Расчет потерь активной и реактивной мощности на соединительном кабеле  $(n - q)$ -го ПЭД

$$\Delta P_{кл(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2) R_{кл(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}; \quad \Delta Q_{кл(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2) X_{кл(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}$$

24

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на выходе  $(n - q)$ -го ТМПН  $P_{ТМПН(n-q)} = P_{ПЭД(n-q)} + \Delta P_{кл(n-q)}$ ;

$$Q_{ТМПН(n-q)} = Q_{ПЭД(n-q)} + \Delta Q_{кл(n-q)}; \quad S_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{P_{ТМПН(n-q)}^2 + Q_{ТМПН(n-q)}^2}$$

25

Расчет напряжения на выходе  $(n - q)$ -го ТМПН

$$U_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{\left( \sqrt{3}U_{1(n-q)} + \frac{P_{ПЭД(n-q)} R_{кл(n-q)} + Q_{ПЭД(n-q)} X_{кл(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{ПЭД(n-q)} X_{кл(n-q)} - Q_{ПЭД(n-q)} R_{кл(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2}$$

26

Расчет падения напряжения на соединительном кабеле  $(n - q)$ -го ПЭД  $\Delta U_{кл(n-q)} = U_{ТМПН(n-q)} - \sqrt{3}U_{1(n-q)}$

27

Расчет коэффициента загрузки  $(n - q)$ -ого ТМПН

$$\beta_{ТМПН(n-q)} = \frac{S_{ТМПН(n-q)}}{10^3 S_{ном.ТМПН(n-q)}}$$

28

Расчет потерь активной, реактивной и полной мощности на  $(n - q)$ -ом ТМПН

$$\Delta P_{ТМПН(n-q)} = 10^3 \left( \Delta P_{xx.ТМПН(n-q)} + \beta_{ТМПН(n-q)}^2 \Delta P_{кз.ТМПН(n-q)} \right);$$

$$\Delta Q_{ТМПН(n-q)} = 10^3 \left( \Delta Q_{xx.ТМПН(n-q)} + \beta_{ТМПН(n-q)}^2 \Delta Q_{кз.ТМПН(n-q)} \right);$$

$$\Delta S_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{ТМПН(n-q)}^2 + \Delta Q_{ТМПН(n-q)}^2}$$

к 29

к 28

29

Расчет потерь напряжения на  $(n - q)$ -ом ТМПН

$$\Delta U_{ТМПН(n-q)} = \frac{R_{ТМПН(n-q)} P_{ТМПН(n-q)} + X_{ТМПН(n-q)} Q_{ТМПН(n-q)}}{k_{ТМПН(n-q)}^2 U_{ТМПН(n-q)}},$$

$$\text{где } R_{ТМПН(n-q)} = \frac{10^3 \Delta P_{кз.ТМПН(n-q)} U_{ном.ТМПН(n-q)}^2}{S_{ном.ТМПН(n-q)}^2};$$

$$X_{ТМПН(n-q)} = 10 U_{к.ТМПН(n-q),\%} \frac{U_{ном.ТМПН(n-q)}^2}{S_{ном.ТМПН(n-q)}}$$

30

Расчет напряжения на выходе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$U_{2nm(n-q)} = \frac{U_{ТМПН(n-q)}}{k_{ТМПН(n-q)}} + \Delta U_{ТМПН(n-q)}$$

31

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на выходе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$P_{2nm(n-q)} = P_{ТМПН(n-q)} + \Delta P_{ТМПН(n-q)}; Q_{2nm(n-q)} = Q_{ТМПН(n-q)} + \Delta Q_{ТМПН(n-q)};$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{2nm(n-q)}^2 + Q_{2nm(n-q)}^2}$$

к 68

к 52

32

Расчет коэффициента загрузки  $(n - q)$ -ого понижающего трансформатора

$$\beta_{nm(n-q)} = \frac{S_{nm(n-q)}}{10^3 S_{ном.nm(n-q)}}$$

33

Расчет потерь активной, реактивной и полной мощности на  $(n - q)$ -ом понижающем трансформаторе

$$\Delta P_{nm(n-q)} = 10^3 \left( \Delta P_{xx.nm(n-q)} + \beta_{nm(n-q)}^2 \Delta P_{кз.nm(n-q)} \right);$$

$$\Delta Q_{nm(n-q)} = 10^3 \left( \Delta Q_{xx.nm(n-q)} + \beta_{nm(n-q)}^2 \Delta Q_{кз.nm(n-q)} \right); \Delta S_{nm(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{nm(n-q)}^2 + \Delta Q_{nm(n-q)}^2}$$

к 34

к 33

34

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на входе  
( $n - q$ )-го понижающего трансформатора

$$P_{1nm(n-q)} = P_{2mn(n-q)} + \Delta P_{mn(n-q)}; \quad Q_{1nm(n-q)} = Q_{2mn(n-q)} + \Delta Q_{mn(n-q)};$$

$$S_{1nm(n-q)} = \sqrt{P_{1nm(n-q)}^2 + Q_{1nm(n-q)}^2}$$

35

Расчет потерь напряжения на ( $n - q$ )-ом понижающем трансформаторе

$$\Delta U_{nm(n-q)} = \frac{R_{nm(n-q)} P_{nm(n-q)} + X_{nm(n-q)} Q_{nm(n-q)}}{k_{nm(n-q)}^2 U_{nm(n-q)}},$$

$$\text{где } R_{nm(n-q)} = \frac{10^3 \Delta P_{кз.nm(n-q)} U_{ном.nm(n-q)}^2}{S_{nm(n-q)}^2} \quad X_{nm(n-q)} = 10 U_{к.nm(n-q),\%} \frac{U_{ном.nm(n-q)}^2}{S_{ном.nm(n-q)}}$$

36

Расчет напряжения на входе ( $n - q$ )-го понижающего трансформатора

$$U_{1nm(n-q)} = U_{2mn(n-q)} k_{mn(n-q)} + \Delta U_{mn(n-q)}$$

37

Расчет потерь активной и реактивной мощности на воздушной линии, отходящей от ( $n - q$ )-го узла

$$\Delta P_{л(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 R_{л(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}; \quad \Delta Q_{л(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 X_{л(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}$$

38

Расчет напряжения на ( $n - q$ )-ом узле отходящей линии

$$U_{(n-q)y,2} = \sqrt{\left( U_{1nm(n-q)} + \frac{P_{1mn(n-q)} R_{л(n-q)} + Q_{1mn(n-q)} X_{л(n-q)}}{U_{1mn(n-q)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{1mn(n-q)} X_{л(n-q)} - Q_{1mn(n-q)} R_{л(n-q)}}{U_{1mn(n-q)}} \right)^2}$$

39

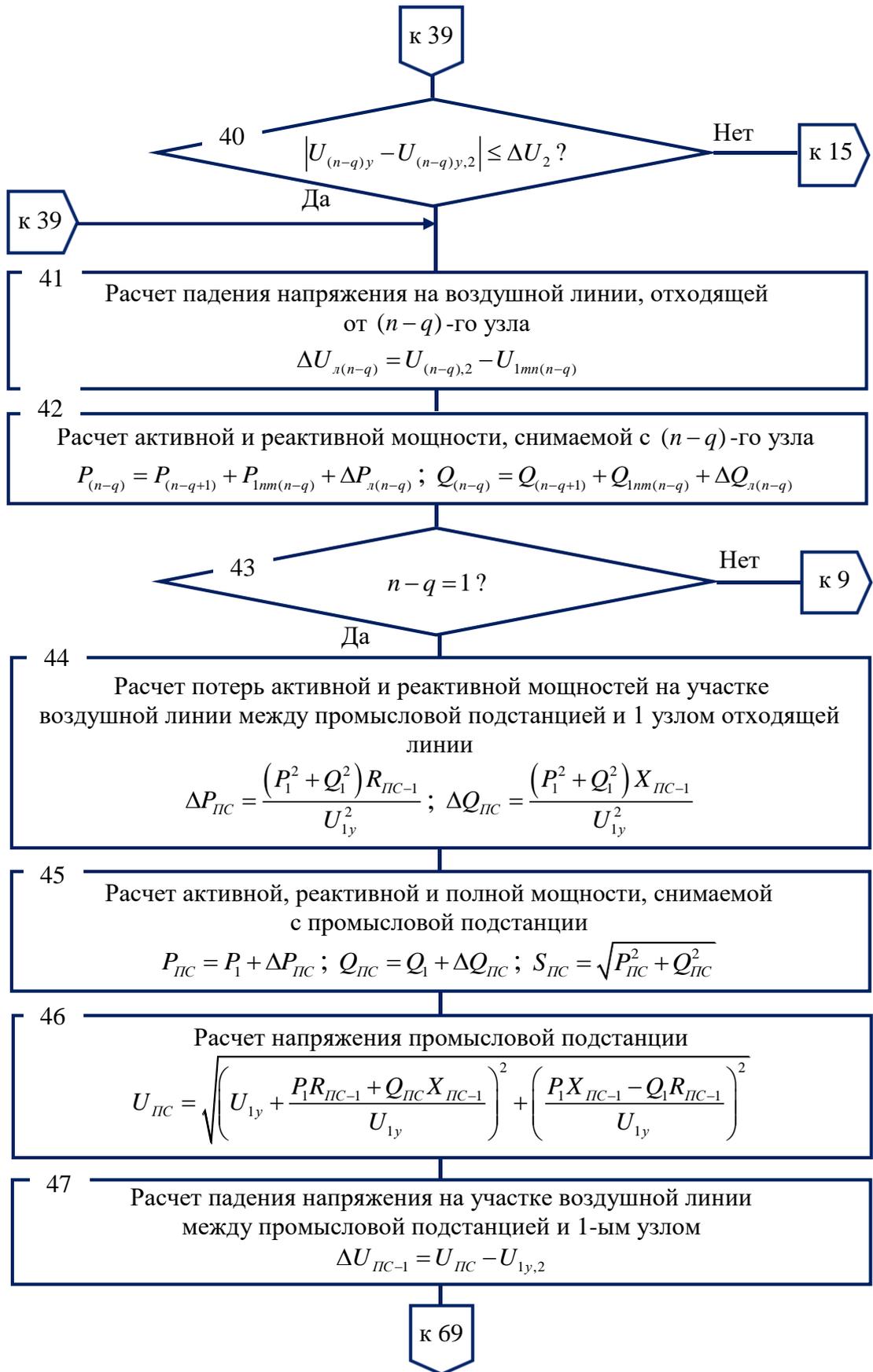
 $q = 0 ?$ 

Да

к 41

Нет

к 40



к 17

48 Расчет средней скорости вращения вала  $(n - q)$ -го двигателя

$$\omega_{(n-q)} = \frac{M_{ном(n-q)}\omega_{0\_50(n-q)} - M_{0(n-q)} \left[ \omega_{0\_50(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\text{дв}(n-q)}^{U_1} (U_{1(n-q).ном} - U_{1(n-q)}) \right]}{M_{ном(n-q)} + k_{M2(n-q)} \left[ \omega_{0\_50(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\text{дв}(n-q)}^{U_1} (U_{1(n-q).ном} - U_{1(n-q)}) \right]}$$

49 Расчет активной мощности, потребляемой  $(n - q)$ -ым двигателем

$$P_{AD(n-q)} = \frac{k_{M2(n-q)}\omega_{(n-q)}^2 + M_{0(n-q)}\omega_{(n-q)}}{\eta_{(n-q)}}$$

50 Расчет среднего скольжения ротора  $(n - q)$ -ого двигателя

$$s_{(n-q)} = \frac{\omega_{0\_50(n-q)} - \omega_{(n-q)}}{\omega_{0\_50(n-q)}}$$

51 Расчет реактивной мощности, потребляемой  $(n - q)$ -ым двигателем

$$Q_{AD(n-q)} = 3U_{1(n-q)}^2 \left[ \frac{s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}}{R_{2\Gamma(n-q)}^2 + s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}^2} + \frac{U_{1(n-q)}^v}{X_{m(n-q)}} - \frac{1}{X_{кв(n-q)}} \right]$$

52 Расчет напряжения и активной, реактивной и полной нагрузки на выходе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$U_{2nm(n-q)} = \sqrt{3}U_{1(n-q)}; P_{2nm(n-q)} = P_{AD(n-q)}; Q_{2nm(n-q)} = Q_{AD(n-q)};$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{AD(n-q)}^2 + Q_{AD(n-q)}^2}$$

к 32

к 18

53

Расчет скорости вращения вала  $(n - q)$ -го двигателя

$$\omega_{(n-q)} = -\frac{M_{ном(n-q)}}{2k_{M(n-q)}d_{1(n-q)}} + \sqrt{\frac{M_{ном(n-q)}^2}{4k_{M(n-q)}^2d_{1(n-q)}^2} + \frac{2\pi f_{1(n-q)}M_{ном(n-q)}}{k_{M(n-q)}d_{1(n-q)}Z_{n(n-q)}} - \frac{M_{0(n-q)}}{k_{M(n-q)}}},$$

где  $d_{1(n-q)} = \omega_{0\_50(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1} (U_{1(n-q).f} - U_{1(n-q)})$

54

Расчет активной мощности, потребляемой  $(n - q)$ -ым двигателем

$$P_{ПЭД(n-q)} = \frac{k_{M(n-q)}\omega_{(n-q)}^3 + M_{0(n-q)}\omega_{(n-q)}}{k_{\eta}\eta_{(n-q)}}$$

55

Расчет скольжения ротора  $(n - q)$ -ого двигателя

$$s_{(n-q)} = \frac{2\pi f_{1(n-q)} - Z_{n(n-q)}\omega_{(n-q)}}{2\pi f_{1(n-q)}}$$

56

Расчет реактивной мощности, потребляемой  $(n - q)$ -ым двигателем

$$Q_{ПЭД(n-q)} = 3 \left[ \frac{U_{1(n-q)}^2 s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)} \frac{f_{1(n-q)}}{50}}{R_{2\Gamma(n-q)}^2 + s_{(n-q)}^2 \left( X_{k(n-q)} \frac{f_{1(n-q)}}{50} \right)^2} + \frac{U_{1(n-q)}^2}{X_{m(n-q)} \frac{f_{1(n-q)}}{50}} - \frac{U_{1(n-q)}^2}{X_{ky(n-q)} \frac{f_{1(n-q)}}{50}} \right]$$

57

Расчет потерь активной и реактивной мощности на соединительном кабеле  $(n - q)$ -го ПЭД

$$\Delta P_{кл(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2) R_{кл(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}; \Delta Q_{кл(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2) X_{кл(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}$$

к 58

к 57

58

Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на выходе

$$(n - q)\text{-го ТМПН } P_{\text{ТМПН}(n-q)} = P_{\text{ПЭД}(n-q)} + \Delta P_{\text{кл}(n-q)} ;$$

$$Q_{\text{ТМПН}(n-q)} = Q_{\text{ПЭД}(n-q)} + \Delta Q_{\text{кл}(n-q)} ; S_{\text{ТМПН}(n-q)} = \sqrt{P_{\text{ТМПН}(n-q)}^2 + Q_{\text{ТМПН}(n-q)}^2}$$

59

Расчет напряжения на выходе  $(n - q)$ -го ТМПН

$$U_{\text{ТМПН}(n-q)} = \sqrt{\left( \sqrt{3}U_{1(n-q)} + \frac{P_{\text{ПЭД}(n-q)} R_{\text{кл}(n-q)} + Q_{\text{ПЭД}(n-q)} X_{\text{кл}(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{\text{ПЭД}(n-q)} X_{\text{кл}(n-q)} - Q_{\text{ПЭД}(n-q)} R_{\text{кл}(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2}$$

60

Расчет падения напряжения на соединительном кабеле

$$(n - q)\text{-го ПЭД } \Delta U_{\text{кл}(n-q)} = U_{\text{ТМПН}(n-q)} - \sqrt{3}U_{1(n-q)}$$

61

Расчет коэффициента загрузки  $(n - q)$ -ого ТМПН

$$\beta_{\text{ТМПН}(n-q)} = \frac{S_{\text{ТМПН}(n-q)}}{10^3 S_{\text{ном.ТМПН}(n-q)}}$$

62

Расчет потерь активной, реактивной и полной мощности на  $(n - q)$ -ом ТМПН

$$\Delta P_{\text{ТМПН}(n-q)} = 10^3 \left( \Delta P_{\text{xx.ТМПН}(n-q)} + \beta_{\text{ТМПН}(n-q)}^2 \Delta P_{\text{кз.ТМПН}(n-q)} \right) k_{\Delta P} ;$$

$$\Delta Q_{\text{ТМПН}(n-q)} = 10^3 \left( \Delta Q_{\text{xx.ТМПН}(n-q)} + \beta_{\text{ТМПН}(n-q)}^2 \Delta Q_{\text{кз.ТМПН}(n-q)} \right) ;$$

$$\Delta S_{\text{ТМПН}(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{\text{ТМПН}(n-q)}^2 + \Delta Q_{\text{ТМПН}(n-q)}^2}$$

63

Расчет потерь напряжения на  $(n - q)$ -ом ТМПН

$$\Delta U_{\text{ТМПН}(n-q)} = \frac{R_{\text{ТМПН}(n-q)} P_{\text{ТМПН}(n-q)} + X_{\text{ТМПН}(n-q)} Q_{\text{ТМПН}(n-q)}}{k_{\text{ТМПН}(n-q)}^2 U_{\text{ТМПН}(n-q)}},$$

$$\text{где } R_{\text{ТМПН}(n-q)} = \frac{10^3 \Delta P_{\text{кз.ТМПН}(n-q)} U_{\text{ном.ТМПН}(n-q)}^2}{S_{\text{ном.ТМПН}(n-q)}^2} ;$$

$$X_{\text{ТМПН}(n-q)} = 10 U_{\text{к.ТМПН}(n-q), \%} \frac{U_{\text{ном.ТМПН}(n-q)}^2}{S_{\text{ном.ТМПН}(n-q)}}$$

к 64

к 63

64 Расчет напряжения на выходе  $(n - q)$ -го преобразователя

$$\text{частоты} \quad U_{ПЧ(n-q)} = \frac{U_{ТМПН(n-q)}}{k_{ТМПН(n-q)}} + \Delta U_{ТМПН(n-q)}$$

65 Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на выходе  $(n - q)$ -го преобразователя частоты

$$P_{ПЧ(n-q)} = P_{ТМПН(n-q)} + \Delta P_{ТМПН(n-q)}; \quad Q_{ПЧ(n-q)} = Q_{ТМПН(n-q)} + \Delta Q_{ТМПН(n-q)};$$

$$S_{ПЧ(n-q)} = \sqrt{P_{ПЧ(n-q)}^2 + Q_{ПЧ(n-q)}^2}$$

66 Расчет активной, реактивной и полной нагрузки на выходе  $(n - q)$ -го понижающего трансформатора

$$P_{2nm(n-q)} = \frac{P_{ПЧ(n-q)}}{\eta_{ПЧ(n-q)}}; \quad Q_{2nm(n-q)} = \frac{P_{ПЧ(n-q)} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{ПЧ(n-q)}}}{\cos \varphi_{ПЧ(n-q)}};$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{2nm(n-q)}^2 + Q_{2nm(n-q)}^2}$$

67 Расчет потерь активной и реактивной и мощности на  $(n - q)$ -ом преобразователе частоты

$$\Delta P_{ПЧ(n-q)} = P_{2nm(n-q)} - P_{ПЧ(n-q)}; \quad \Delta Q_{ПЧ(n-q)} = Q_{2nm(n-q)} - Q_{ПЧ(n-q)}$$

68 Расчет падения напряжения на  $(n - q)$ -ом преобразователе частоты

$$\Delta U_{ПЧ(n-q)} = U_{2nm(n-q)} - U_{ПЧ(n-q)}$$

к 32

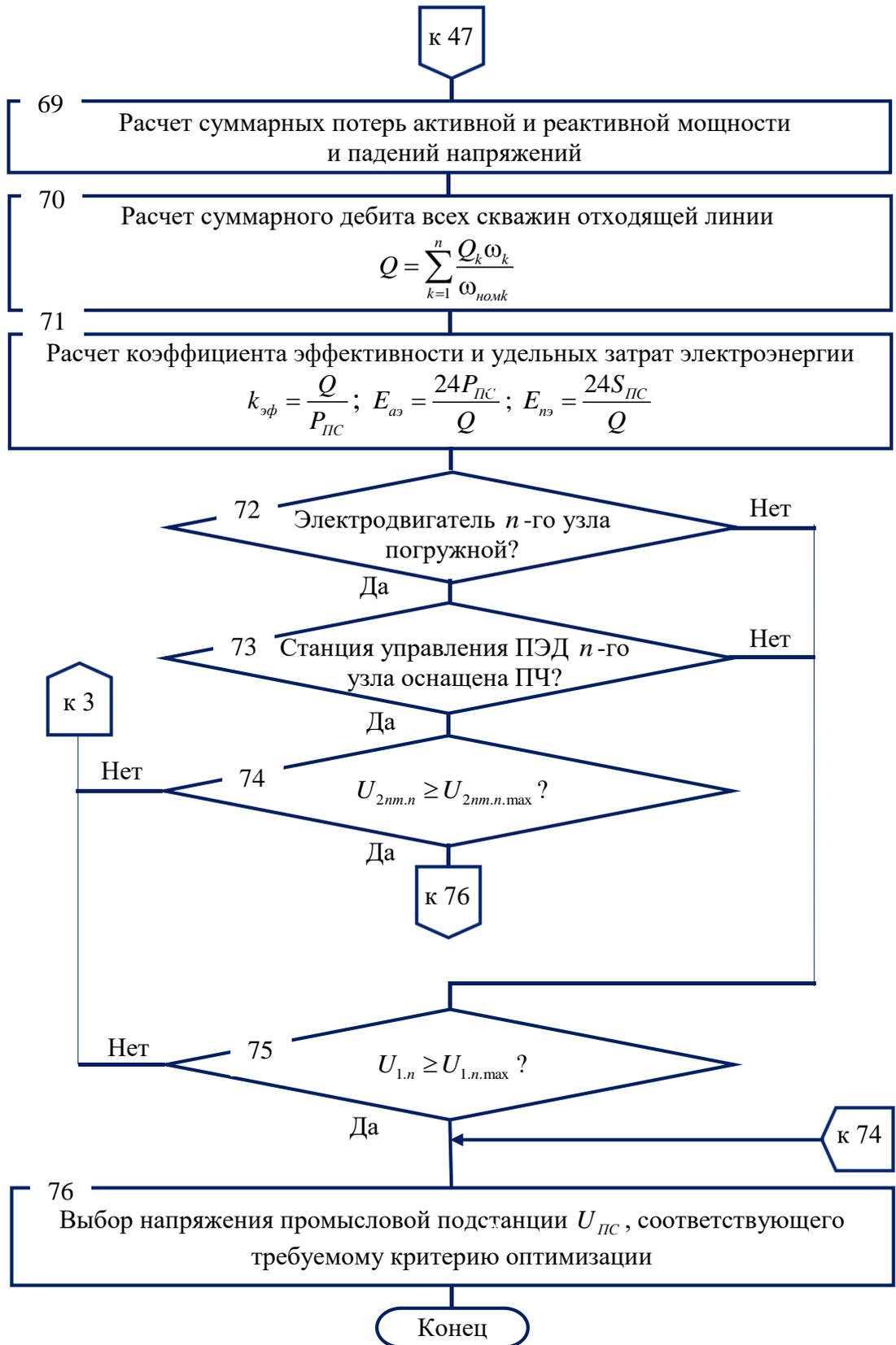


Рисунок 25 – Алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции

При этом задействуются вычисления в блоках 11 – 16, причем в цикле перебора напряжений ЭКДС с номерами от 1 до  $(n - 1)$  варьируется либо напряжение  $U_{1(n-q)}$ , либо  $U_{2nm(n-q)}$  в зависимости от комплектации оборудования скважины.

После перебора всего заданного диапазона напряжений  $U_{1n}$  или  $U_{2nm.n}$ , что анализируется блоками 74 и 75, алгоритм переходит в блок 76, в котором определяется оптимальная величина напряжения промышленной подстанции  $U_{ПС}$ , соответствующая требуемому критерию оптимизации.

Продемонстрируем разработанную методику расчета на примере гипотетической отходящей от промышленной подстанции неразветвленной линии, питающей электротехнические комплексы добывающих скважин (рисунок 26). Она содержит 3 узла, к которым подключены ЭКДС с различной комплектацией наземного и погружного оборудования. Промышленная подстанция ПС соединена с первым и последующим узлами воздушными линиями, имеющими активные и индуктивные сопротивления  $R_{ПС-1}$ ,  $X_{ПС-1}$ ,  $R_{1-2}$ ,  $X_{1-2}$ ,  $R_{2-3}$  и  $X_{2-3}$ . Первый узел питает электрической энергией асинхронный двигатель М1 штанговой скважинной насосной установки через понижающий трансформатор ПТ1 и воздушную линию с параметрами  $R_{л1}$  и  $X_{л1}$ . Вторым узлом осуществляется снабжение электрической энергией асинхронный погружной электродвигатель М2, приводящий в движение центробежный насос. При этом напряжение от узла 2 передается на двигатель через воздушную линию  $R_{л2}$ ,  $X_{л2}$ , понижающий трансформатор ПТ2, преобразователь частоты ПЧ2, повышающий трансформатор ТМПН2 и соединительный кабель  $R_{кл2}$ ,  $X_{кл2}$ . В состав электротехнического комплекса, подключенного к третьему узлу, входит воздушная линия  $R_{л3}$ ,  $X_{л3}$ , понижающий трансформатор ПТ3, повышающий трансформатор ТМПН3, соединительный кабель  $R_{кл3}$ ,  $X_{кл3}$  и погружной электродвигатель М3 центробежного насоса. Для компенсации

реактивной энергии к статорным обмоткам двигателя М3 подключена индивидуальная конденсаторная установка КУ3.

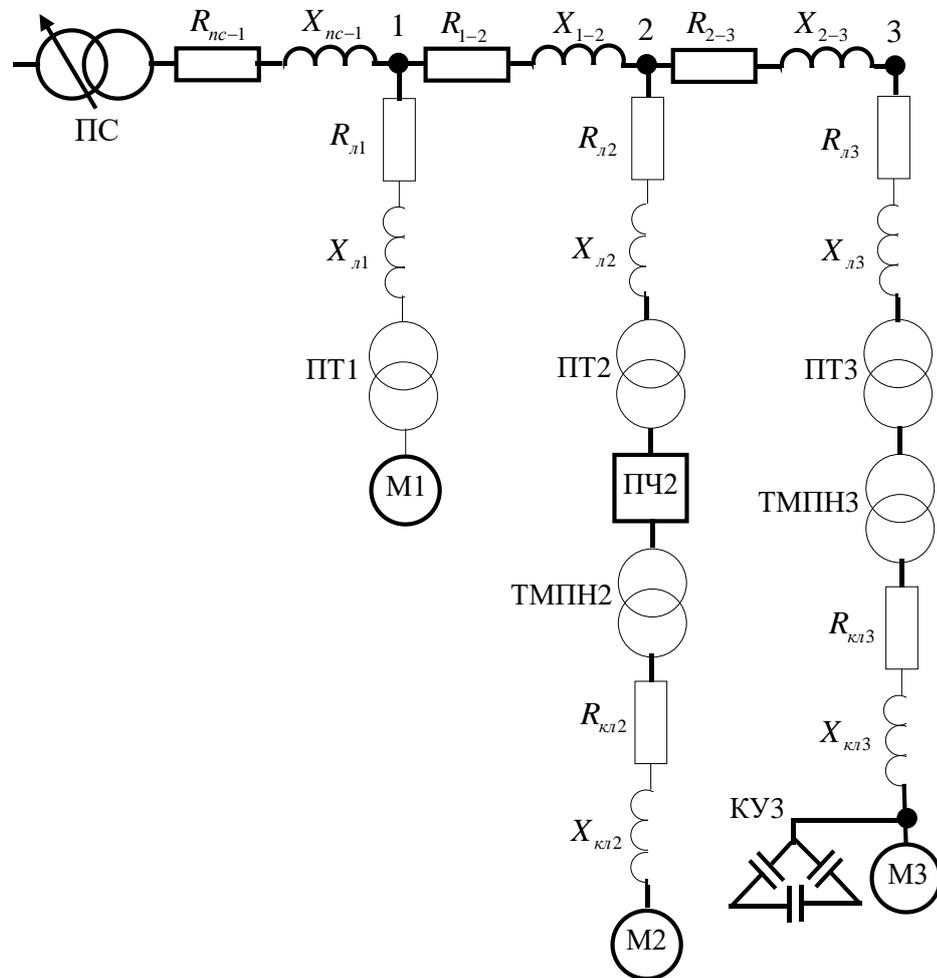


Рисунок 26 – Принципиальная схема гипотетической отходящей линии с тремя различными электротехническими комплексами добывающих скважин

Предположим, что рассматриваемые электротехнические комплексы добывающих скважин гипотетической отходящей линии оснащены погружными двигателями ПЭД2 и ПЭД3 типа ЭДТ45-103М1 и асинхронным двигателем ВА132S6 в составе ШСНУ. Двигатели приводят в движение центробежные насосы 0215ЭЦНАКИ5-125И с номинальным напором 1450 м при работе на воде и номинальной производительностью  $125 \text{ м}^3/\text{сут.}$  и плунжерный насос НСН 2В с цепным приводом ЦП-60.

В состав комплексов входят понижающие трансформаторы ТМГФ 25/10 (ПТ1), ТМГФ 100/10 (ПТ2 и ПТ3) и повышающие трансформаторы

ТМПНГ100/3 (ТМПН2 и ТМПН3). Соединительные кабели, с помощью которых погружные двигатели подключены к повышающим трансформаторам имеют активные сопротивления  $R_{кл2} = R_{кл3} = 1,119$  Ом и реактивные сопротивления  $X_{кл2} = X_{кл3} = 0,126$  Ом, Сопротивления воздушных линий, соединяющих понижающие трансформаторы с узлами отходящей линии, имеют следующие значения:  $R_{л1} = R_{л2} = R_{л3} = 0,207$  Ом,  $X_{л1} = X_{л2} = X_{л3} = 0,172$  Ом. Участки отходящей линии между узлами характеризуются сопротивлениями:  $R_{ПС-1} = 1,02$  Ом;  $X_{ПС-1} = 0,85$  Ом;  $R_{1-2} = 1,224$  Ом;  $X_{1-2} = 1,202$  Ом;  $R_{2-3} = 0,612$  Ом;  $X_{2-3} = 0,51$  Ом. Индивидуальные конденсаторные батареи, установленные непосредственно на ПЭД имеют реактивное сопротивление  $X_{ку} = 70,771$  Ом.

Будем считать, что скважина с ЭКДС3 работает в таком же режиме, как рассмотрено в примере, приведенном на рисунке 17, и производительность насоса  $Q_{нас} = 87$  м<sup>3</sup>/сутки при номинальном напряжении достигается дросселированием штуцера. Такая же производительность насоса во второй скважине достигается за счет применения преобразователя частоты в ЭКДС2, причем параметры скважины аналогичны параметрам, рассмотренным в примере, приведенном на рисунке 21.

Анализ данных таблицы 8 показывает, что в рамках принятых ограничений на изменение напряжения самого удаленного электродвигателя минимум потребление активной  $P_{ПС}$  и полной мощности  $S_{ПС}$  будет достигаться при напряжении промышленной подстанции  $U_{ПС} = 5421$  В. При этом снижается удельное потребление электрической энергии  $E_{аэ}$  и  $E_{нэ}$  на кубометр добытой из скважин жидкости и повышается коэффициент энергетической эффективности  $k_{eff}$ . В то же время, если будет поставлена цель добиваться снижения потерь в кабельных, воздушных линиях и трансформаторах, то минимуму потерь будет соответствовать напряжение  $U_{ПС} = 6540$  В.

Проведенные расчеты также позволяют сделать вывод, что потребляемая активная мощность  $P_{ПС}$  изменяется на 3,2 % относительно минимального значения при заданном диапазоне изменения напряжения промышленной подстанции от 5421 В до 6540 В.

Таблица 8 – Зависимости параметров энергетической эффективности от напряжения промышленной подстанции для гипотетической отходящей линии, приведенной на рисунке 26

$\Delta U_{2mm.3}, \%$	-10	-5	-2,5	0	2,5	5	10
$\Delta P, \text{кВт}$	7,16	7,00	6,93	6,87	6,93	6,88	<b>6,78</b>
$U_{ПС}, \text{В}$	5421	5698	5837	5976	6120	6339	6540
$P_{ПС}, \text{кВт}$	<b>77,82</b>	78,35	78,63	78,92	79,35	79,66	80,32
$Q_{ПС}, \text{кВАр}$	33,10	32,90	33,30	33,20	37,48	37,51	37,53
$Q, \text{м}^3/\text{сут}$	160,61	161,07	161,3	161,53	161,77	162,01	162,49
$k_{эф} = \frac{Q}{P_{ПС}}, \text{м}^3/\text{сут} \cdot \text{кВт}$	<b>2,064</b>	2,056	2,051	2,047	2,039	2,034	2,023
$E_{ав} = \frac{24P_{ПС}}{Q}, \text{кВт} \cdot \text{час}/\text{м}^3$	<b>11,63</b>	11,67	11,70	11,73	11,77	11,80	11,86
$S_{ПС}, \text{кВА}$	<b>84,55</b>	84,98	85,40	85,61	87,75	88,05	88,66
$E_{нз} = \frac{24S_{ПС}}{Q}, \text{кВА} \cdot \text{час}/\text{м}^3$	<b>12,64</b>	12,66	12,71	12,72	13,02	13,04	13,09

### 3.5 Выводы по третьей главе

1. Разработанная методика и алгоритм расчета позволяют определить оптимальную величину напряжения промышленной подстанции для широкого спектра критериев оптимизации.

2. Разработанная методика расчета оптимального напряжения промышленной подстанции учитывает особенности напорных характеристик центробежных и плунжерных насосов и преобразователей частоты и их влияние на потребление активной и реактивной мощности электротехническими комплексами добывающих скважин.

3. Рассмотренные различные примеры комплектации электротехнических комплексов добывающих скважин и проведенные с помощью разрабо-

танной методики расчеты доказывают актуальность регулирования напряжения промышленной подстанции, поскольку позволяют снизить потребление активной мощности до 6 %, а полной мощности – до 18 %, что значительно повышает энергетическую эффективность электротехнического комплекса добычи нефти.

4. Проведенный комплекс расчетов позволяет также сделать вывод, что на относительные значения снижения потребления электрической энергии и величину оптимального напряжения промышленной подстанции существенно влияет наличие конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности преобразователей частоты в станциях управления погружными насосами

## **4 ДОСТИЖИМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ НЕФТИ С УЧЕТОМ ДИСКРЕТНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ**

### **4.1 Влияние дискретности регулирования напряжения промысловой подстанции на потребляемую мощность электротехническими комплексами погружных насосов**

Как правило, промышленные подстанции, осуществляющие питание электротехнических комплексов погружных насосов, оснащены трансформаторами с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН). Как было показано в предыдущей главе, регулирование выходного напряжения промышленной подстанции позволяет повысить энергетическую эффективность механизированной добычи нефти, поскольку существует нелинейная зависимость между напряжением, питающим электротехнические комплексы добывающих скважин, и потребляемой мощностью.

Расчет оптимального значения напряжения промышленной подстанции позволяет выбрать такую величину  $U_{ПС}$ , которая обеспечивает тот или иной критерий оптимизации [53, 78, 84-86]. Однако трансформаторы с РПН позволяют регулировать напряжение с определенным шагом, зависящим от конструктивного исполнения, что приводит к невозможности точного обеспечения требуемой оптимальной величины. В связи с этим, актуальным является определение влияния дискретности регулирования напряжения промышленной подстанции на показатели энергетической эффективности электротехнического комплекса добычи нефти.

Для учета особенностей регулирования напряжения промышленной ПС с помощью устройства РПН необходимо учитывать его характеристики. Они задаются в виде максимального числа положительных и отрицательных по отношению к основному выводу обмотки высокого напряжения регулировочных ответвлений с указанием шага коэффициента трансформации

в виде  $\pm j \Delta k_T$ , где  $\Delta k_T$  – величина изменения номинального напряжения на шинах низкого напряжения промышленной подстанции в %,  $j$  – номер отпайки устройства РПН. Таким образом, напряжение на шинах низкого напряжения промышленной подстанции с учетом регулирования устройством РПН можно определить по формуле

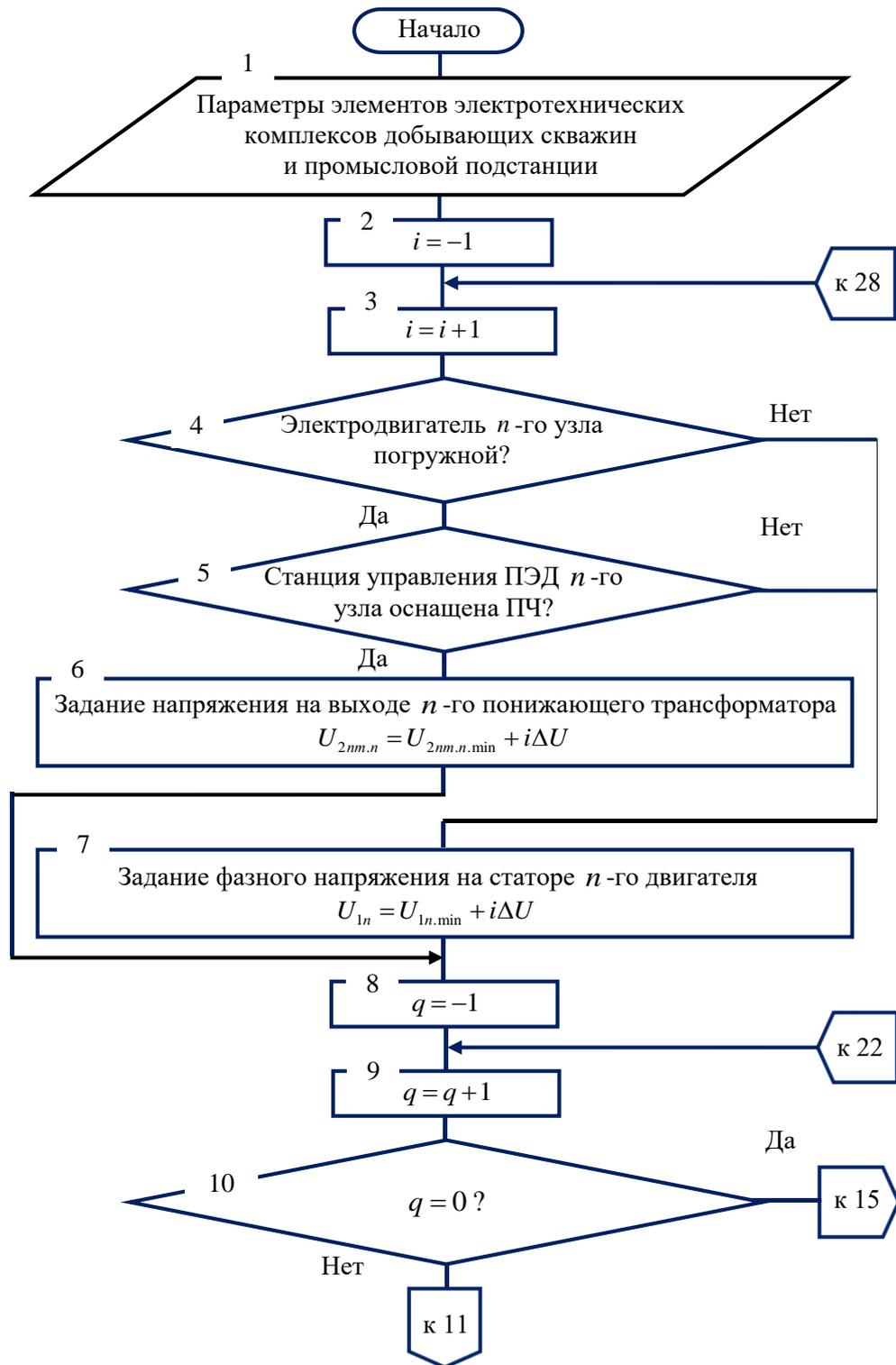
$$U_{ПС.j} = U_{ПС.ном} \left( 1 \pm j \frac{\Delta k_T}{100} \right), \quad (137)$$

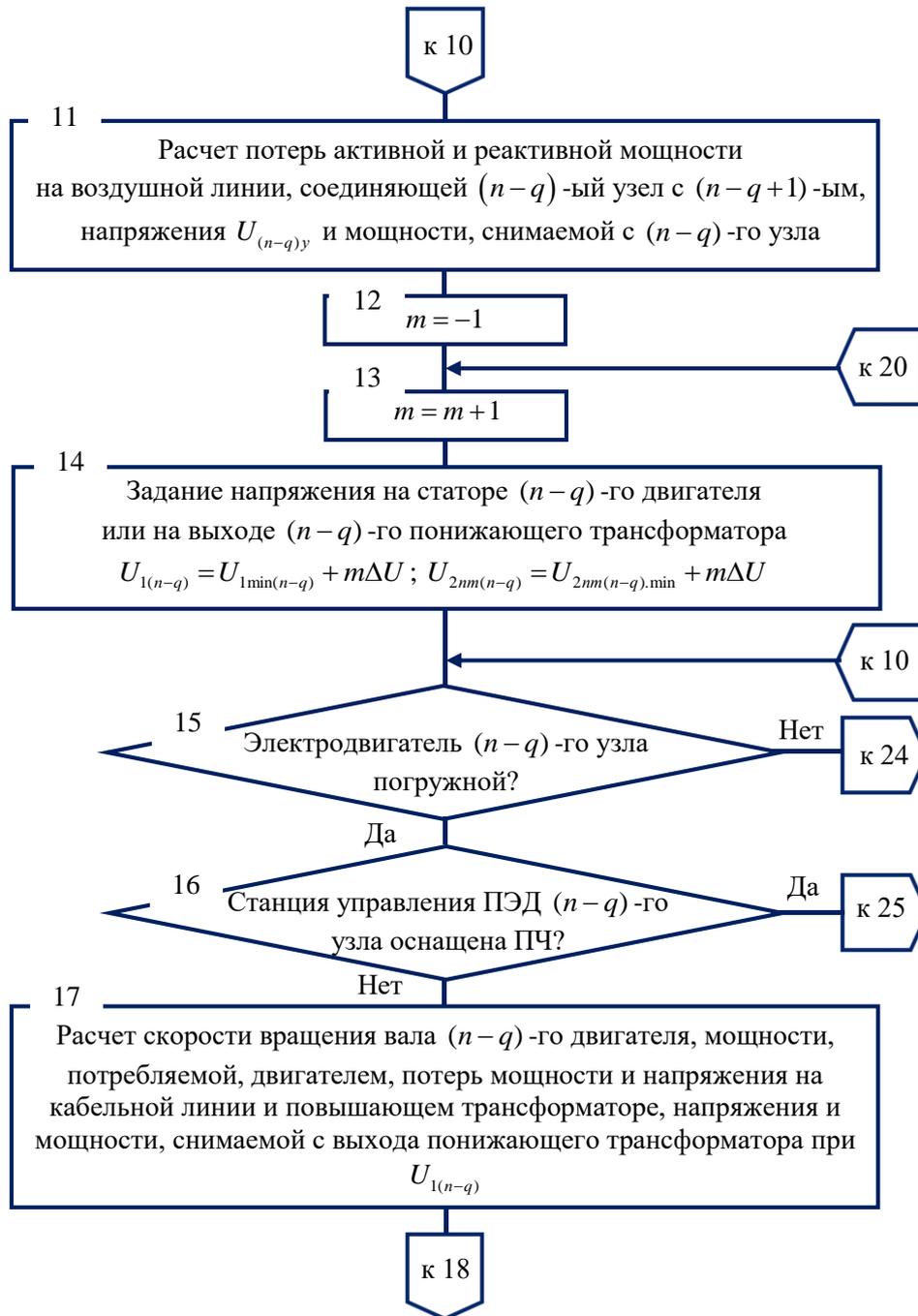
где  $U_{ПС.ном}$  – величина номинального напряжения на шинах низкого напряжения промышленной подстанции.

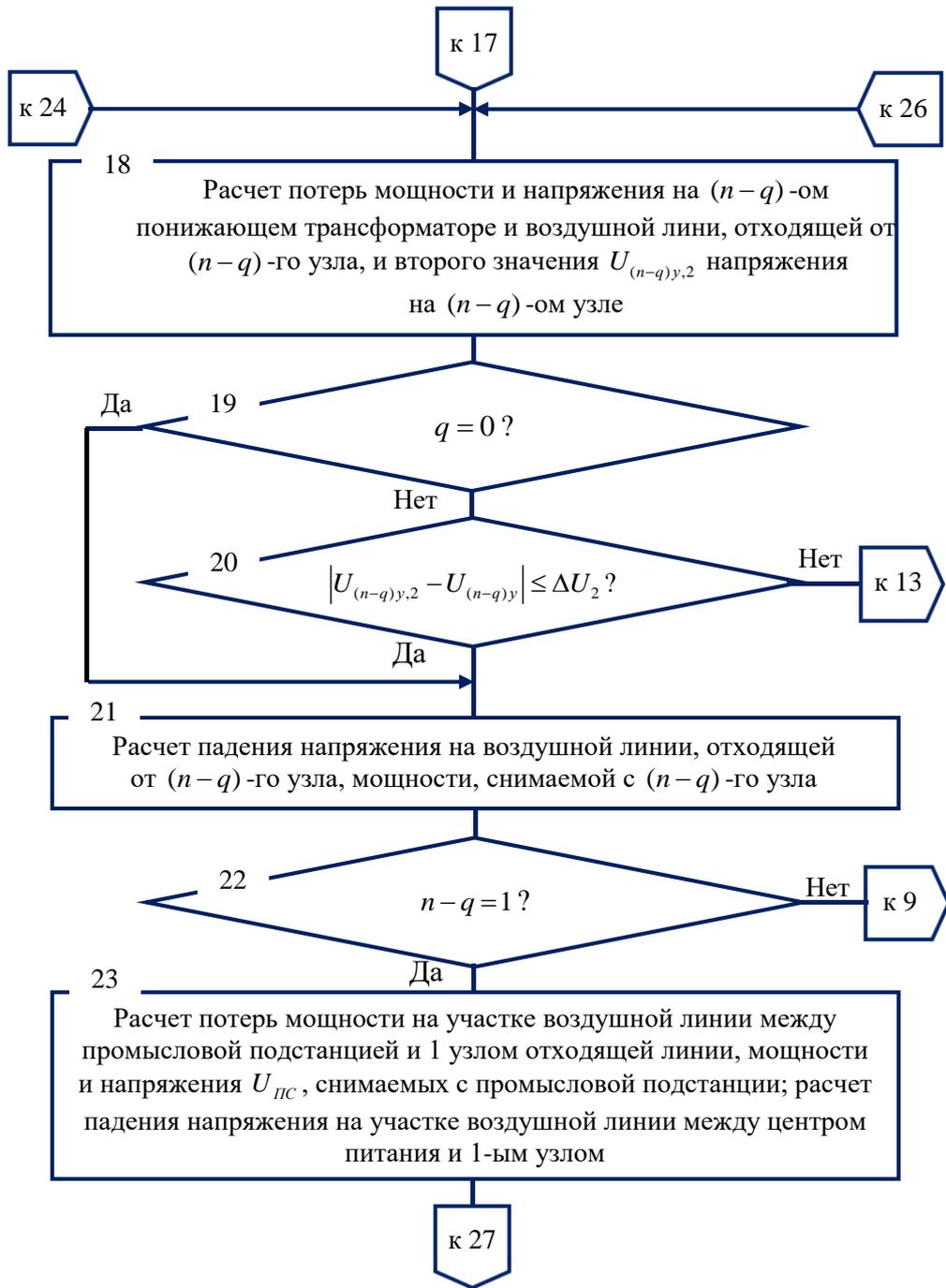
Очевидно, что после определения оптимальной величины напряжения  $U_{ПС.опт}$ , необходимо выбрать ближайшее большее или меньшее значение  $U_{ПС.j}$ . При этом следует учитывать тот факт, что если  $U_{ПС.опт}$  соответствует минимальному значению  $U_{1.n}$  или  $U_{2nm.n}$ , то должно выполняться неравенство  $U_{ПС.j} \geq U_{ПС.ном}$ . И наоборот, если  $U_{ПС.опт}$  соответствует максимальному значению  $U_{1.n}$  или  $U_{2nm.n}$ , то выбирается  $U_{ПС.j} \leq U_{ПС.ном}$ .

Для неразветвленной отходящей линии с электротехническими комплексами добывающих скважин, приведенной на рисунке 24, с произвольным числом узлов  $n$  был разработан алгоритм расчета ожидаемых квазиоптимальных потерь на элементах ЭКДС и потребляемой активной  $P_{ПС}$ , реактивной  $Q_{ПС}$  и полной  $S_{ПС}$  мощности от промышленной подстанции с учетом дискретности регулирования напряжения (рисунок 27) [87]. При его разработке за основу был взят алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, приведенный на рисунке 25 [84]. При этом практически все исходные данные для расчета, задаваемые в блоке 1, совпадают в этих алгоритмах. Исключениями являются отсутствие в новом алгоритме заданных величин  $\Delta U_{step.n}$  и  $\Delta U_{2nm.n.step}$ .

Весь алгоритм расчета, представленный на рисунке 27 укрупненно, повторяет алгоритм, приведенный на рисунке 25.







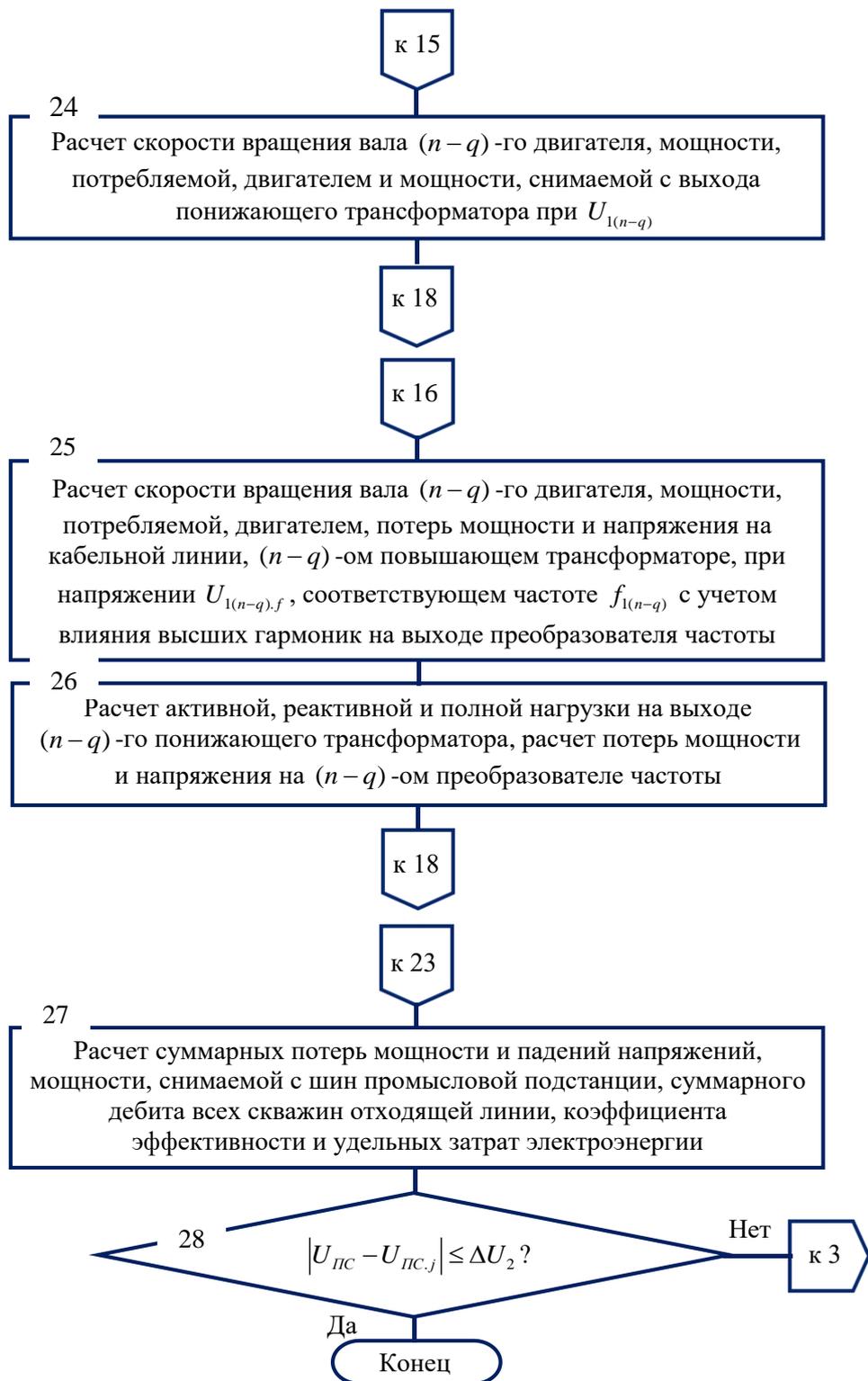


Рисунок 27 – Алгоритм расчета ожидаемых квазиоптимальных потерь на элементах ЭКДС отходящей линии и потребляемой активной реактивной и полной мощности от промышленной подстанции с учетом дискретности регулирования напряжения

Однако при задании напряжения на выходе  $n$ -го понижающего трансформатора или асинхронного двигателя используется приращение  $\Delta U$ , такое же, как и для соответствующих элементов ЭКДС, подключенных к узлам с меньшими номерами. При этом расчеты, производимые в блоке 27 алгоритма, представленного на рисунке 27, совпадают с вычислениями, приведенными в совокупности блоков 69 – 71, алгоритма, приведенного на рисунке 25.

Отличительной особенностью алгоритма расчета ожидаемых квазиоптимальных потерь на элементах ЭКДС отходящей линии и потребляемой активной реактивной и полной мощности от промышленной подстанции с учетом дискретности регулирования напряжения является также то, что расчет заканчивается после того, как в блоке 28 выполнится условие

$$|U_{ПС} - U_{ПС.j}| \leq \Delta U_2.$$

Для оценки влияния дискретности регулирования напряжения промышленной подстанции на потребляемую мощность электротехническими комплексами добывающих скважин рассмотрим тот же самый пример гипотетической отходящей линии, содержащей 3 узла и представленной на рисунке 26. При этом предположим, что промышленная подстанция, оснащена устройством РПН  $\pm 8 \times 1,5 \%$ .

Расчет, приведенный выше, показывает, что оптимальная величина напряжения промышленной подстанции составляет 5421 В. При этом рассматриваемая отходящая линия потребляет активную мощность  $P_{ПС.онт} = 77,82$  кВт, полную мощность  $S_{ПС.онт} = 84,55$  кВА, а общий дебит скважин составляет  $Q_{онт} = 160,61$  м<sup>3</sup>/сут. Удельное потребление электроэнергии равно  $E_{э.онт} = 11,63$  кВт·час/м<sup>3</sup>, а коэффициент эффективности –  $k_{эф.онт} = 2,064$  м<sup>3</sup>/сут·кВт.

Однако ближайшее значение напряжения, которое можно получить с выхода промышленной подстанции с устройством РПН  $\pm 8 \times 1,5 \%$ , соответст-

вует установке отпайки  $j = -8$  и составляет  $U_{ПС.j} = 5544$  В. Разработанный алгоритм, приведенный на рисунке 27, позволяет рассчитать потребляемую мощность и удельное потребление электрической энергии при таком уровне напряжения промышленной подстанции:  $P_{ПС} = 78,05$  кВт,  $S_{ПС} = 84,75$  кВА,  $Q = 160,81$  м<sup>3</sup>/сут.,  $E_{аз} = 11,65$  кВт·час/м<sup>3</sup>,  $k_{эф} = 2,06$  м<sup>3</sup>/сут·кВт.

Сравнение расчетных данных по энергопотреблению показывает, что, как и ожидалось, увеличение выходного напряжения промышленной подстанции до ближайшего большего значения, определяемого соответствующей отпайкой, приводит к незначительному увеличению удельного потребления электроэнергии и снижению коэффициента эффективности. Действительно, потребление активной мощности увеличилось на 0,3 %, полной мощности – на 0,2 %, удельные затраты активной энергии на добычу 1 м<sup>3</sup> жидкости – на 0,17 %. При этом объем добываемой из скважины жидкости увеличился всего лишь на 0,12 %.

Уменьшение выходного напряжения (если бы это было возможно) промышленной подстанцией, оснащенной трансформатором с РПН, также нецелесообразно, поскольку возникает риск срыва работы погружных насосов при провалах напряжения сети, вызванных запуском мощных электродвигателей наземного оборудования.

#### **4.2 Подготовка данных для расчета оптимального значения напряжения промышленной подстанции, питающей реальную отходящую линию**

Применим разработанную универсальную методику и алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, питающей реальную отходящую линию на нефтяном промысле. Поопорная схема такой линии представлена на рисунке 28, а принципиальная схема – на рисунке 29. Она содержит 6 узлов, к которым подключены электротехнические комплексы 11-ти добывающих скважин.

Для расчета оптимального значения напряжения промышленной подстанции, питающей рассматриваемую отходящую линию, необходимо подготовить исходные данные.

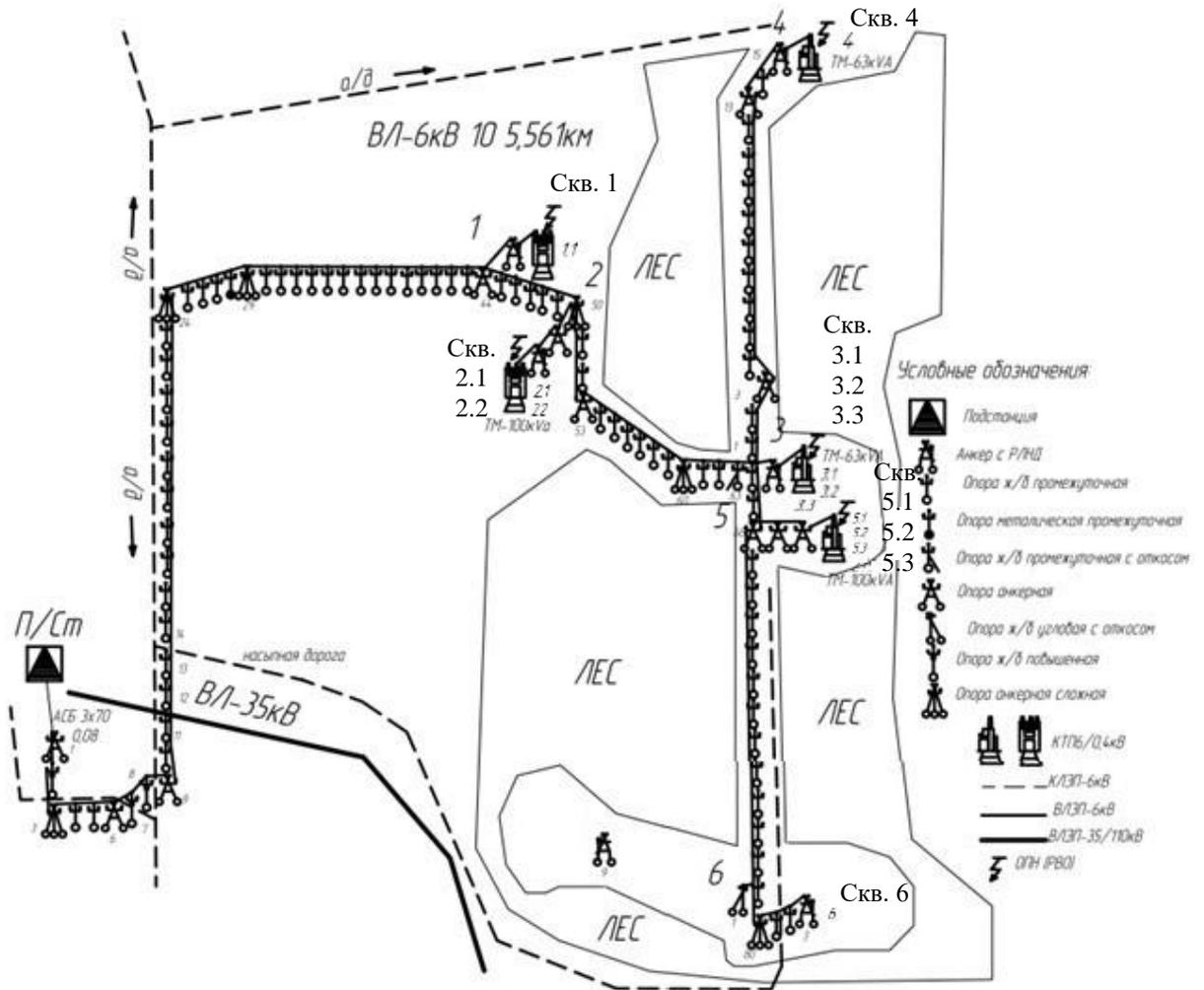


Рисунок 28 – Пример реальной поопорной схемы отходящей линии

Прежде всего, необходимо проанализировать применяемое подземное и наземное оборудование скважин, которые оснащены различными типами погружных насосов, как центробежных с ПЭД, так и плунжерных со станками-качалками (таблица 9).

В электротехнических комплексах добывающих скважин применен целый ряд понижающих и повышающих трансформаторов, технические характеристики которых приведены в таблице 10. Для соединения между промышленной подстанцией и узлами, а также между узлами и понижающими трансформаторами применены воздушные линии, параметры которых приведены в таблице 11. Напряжение на статоры погружных электродвигателей подается посредством соединительных кабелей, параметры которых также приведены в таблице 11.

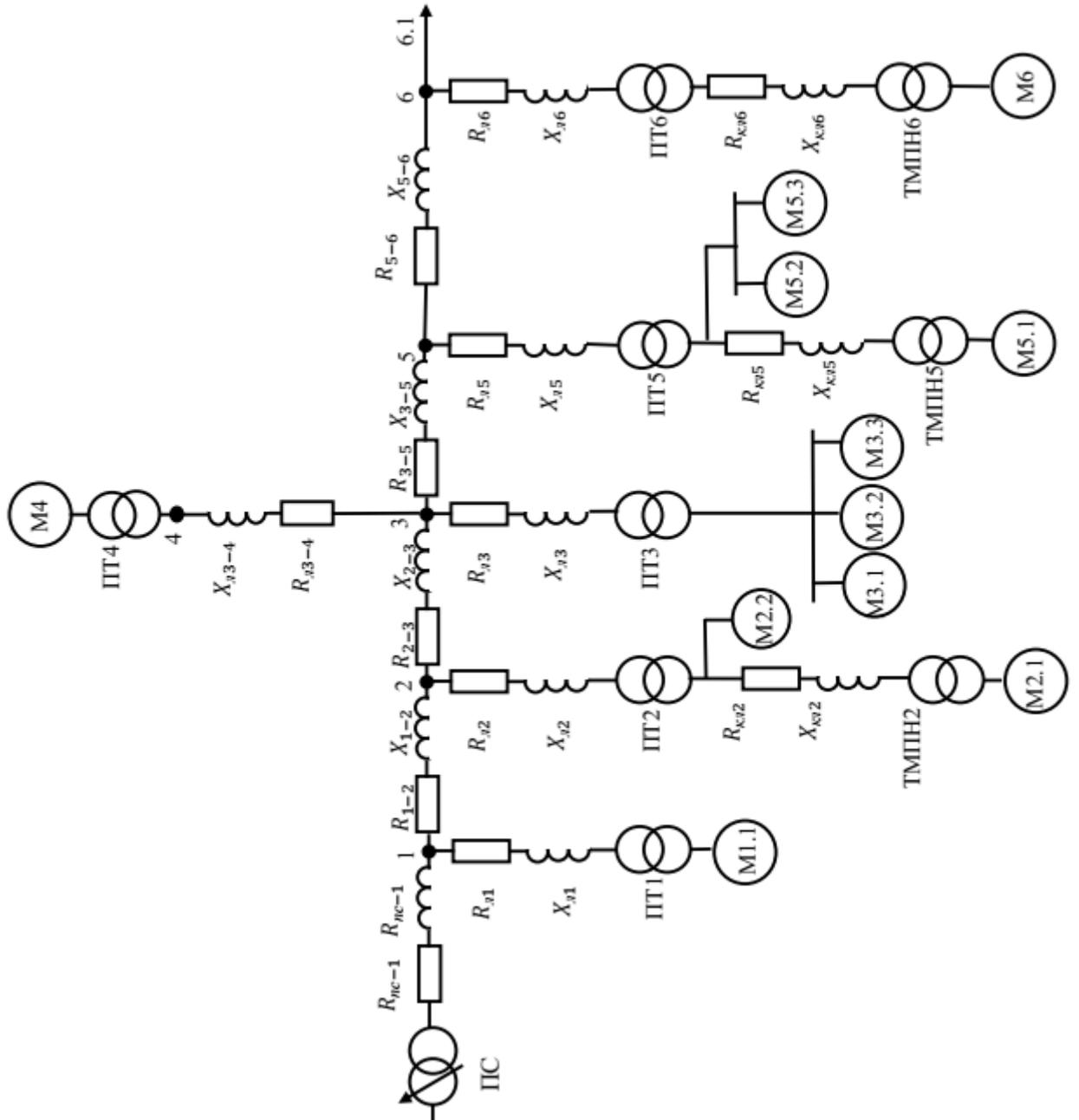


Рисунок 29 – Принципиальная схема реальной отходящей линии  
нефтяного промысла

Таблица 9 – Данные по погружным насосам, станкам-качалкам и двигателям, применяемым на скважинах

№ скважины	Тип насоса или станка-качалки	Тип двигателя	Мощность двигателя, кВт
1	СКДР6-3,0	АИР160М8	11
2.1	ЭЦНА5-125-1450	ЭДТ45-103М1	45
2.2	ПНШ 80-3-40-01	АИР200М8	18,5
3.1	UP-12Т-3000-5500	АИР200L8	22
3.2	UP-12Т-3000-5500	АИР200L8	22
3.3	UP-12Т-3000-5500	АИР200L8	22
4	UP-12Т-3000-5500	ASI250 S75-8	37
5.1	ЭЦНА5-30-1300	ЭДТ16-117М	16
5.2	ПНШ 80-3-40-01	АИР200М8	18,5
5.3	UP-12Т-3000-5500	ASI250 M75-8	45
6	ЭЦНА5-125-1450	ЭДТ45-103М1	45

Таблица 10 – Данные трансформаторов, подключенных к рассматриваемой отходящей линии нефтяного промысла

Трансформатор	Тип трансформатора	$S_{ном}$ , кВА	$U_{НН}$ , кВ	$U_{ВН}$ , кВ	$\Delta P_{xx}$ , кВт	$\Delta P_{кз}$ , кВт	$i_{xx}$ , %	$U_{к}$ , %
ПТ1	ТМГ 63/10	63	0,4	6	0,22	1,28	2,4	4,5
ПТ2	ТМГ 100/10	100	0,4	6	0,29	1,98	2,2	4,5
ПТ3	ТМГ 63/10	63	0,4	6	0,22	1,28	2,4	4,5
ПТ4	ТМГ 100/10	100	0,4	6	0,29	1,98	2,2	4,5
ПТ5	ТМГ 100/10	100	0,4	6	0,29	1,98	2,2	4,5
ПТ6	ТМГ 63/10	63	0,4	6	0,22	1,28	2,4	4,5
ТМПН2	ТМПНГ100/3	100	0,4	1,46	0,31	2,4	2,2	5,5
ТМПН5	ТМПНГ100/3	100	0,4	0,82	0,31	2,4	2,2	5,5
ТМПН6	ТМПНГ100/3	100	0,4	1,46	0,31	2,4	2,2	5,5

Таблица 11 – Активные и индуктивные сопротивления соединительных кабелей и воздушных линий рассматриваемой отходящей линии

$R_{ПС-1}$ , Ом	$X_{ПС-1}$ , Ом	$R_{1-2}$ , Ом	$X_{1-2}$ , Ом	$R_{2-3}$ , Ом	$X_{2-3}$ , Ом	$R_{3-4}$ , Ом	$X_{3-4}$ , Ом	$R_{3-5}$ , Ом	$X_{3-5}$ , Ом
1,024	0,828	0,138	0,115	0,322	0,267	0,345	0,287	0,069	0,057
$R_{5-6}$ , Ом	$X_{5-6}$ , Ом	$R_{л1}$ , Ом	$X_{л1}$ , Ом	$R_{л2}$ , Ом	$X_{л2}$ , Ом	$R_{л3}$ , Ом	$X_{л3}$ , Ом	$R_{л4}$ , Ом	$X_{л4}$ , Ом
0,299	0,248	0,023	0,019	0,046	0,038	0,023	0,019	0	0
$R_{л5}$ , Ом	$X_{л5}$ , Ом	$R_{л6}$ , Ом	$X_{л6}$ , Ом	$R_{кл2}$ , Ом	$X_{кл2}$ , Ом	$R_{кл5}$ , Ом	$X_{кл5}$ , Ом	$R_{кл6}$ , Ом	$X_{кл6}$ , Ом
0,046	0,038	0,023	0,019	1,098	0,14	1,776	0,145	1,254	0,16

Для расчета оптимального значения напряжения промышленной подстанции необходимо знать значения коэффициентов  $k_M$  для центробежных насосов и  $k_{M2}$  для плунжерных, а также определить величину момента  $M_0$ . Кроме того, необходимо знать параметры Г-образной схемы замещения асинхронных двигателей, как погружных, так и наземных, и коэффициенты  $k_{\partial y}^U$ .

Параметры Г-образных схем замещений асинхронных двигателей АИР160М8, АИР200М8 и АИР200L8, применяемых в соответствующих станках-качалках, можно определить по справочным данным [4]. Для погружных электродвигателей ЭДТ16-117М и ЭДТ45-103М1 и наземных асинхронных двигателей импортного производства ASI250 S75-8 и ASI250 M75-8 эти параметры можно рассчитать, исходя из номинальных данных, приведенных в каталогах, по следующим формулам [4]

$$d = \frac{d_0(1-\eta_{ном})(1-s_{ном})}{\xi\eta_{ном}s_{ном}} - 1; \quad (138)$$

$$R_m = \frac{3U_{1\phi,ном}(1-s_{ном})}{2P_{ном}(\lambda + \xi - 1)}; \quad (139)$$

$$G = \frac{1}{s_{ном}^2} + \frac{2d}{s_{ном}} + d^2; \quad (140)$$

$$e = \frac{\lambda + \xi - 1}{\xi}; \quad (141)$$

$$R_{2\Gamma} = \frac{R_m}{G} \left[ \frac{e}{s_{ном}} + d + \sqrt{\left( \frac{e}{s_{ном}} + d \right)^2 - G} \right]; \quad (142)$$

$$R_{1\Gamma} = dR_{2\Gamma}; \quad (143)$$

$$X_k = \sqrt{R_m^2 - 2R_m R_{1\Gamma}}; \quad (144)$$

$$X_{1\Gamma} = 0,42X_k; \quad (145)$$

$$X_{2\Gamma} = 0,58X_k; \quad (146)$$

$$Q_m = \frac{P_{ном} \operatorname{tg} \varphi}{\eta_{ном}} - \frac{U_{1л.ном}^2 X_k}{\left( R_{1\Gamma} + \frac{R_{2\Gamma}}{\eta_{ном}} \right)^2 + X_k^2}; \quad (147)$$

$$X_m = \frac{U_{1л.ном}^2}{Q_m} - X_{1\Gamma}, \quad (148)$$

где  $\lambda$  – перегрузочная способность,  $\xi = 1,02$ ,  $d_0 = 0,58$  – рекомендуемые коэффициенты [4].

В результате для рассматриваемых электродвигателей номинальные технические характеристики и параметры  $\Gamma$ -образных схем замещения будут иметь следующие значения (таблица 12).

Таблица 12 – Номинальные технические характеристики и параметры  $\Gamma$ -образной схемы замещения электродвигателей центробежных насосов и станков-качалок

Двигатель	Параметры					
	$P_{ном}$ , кВт	$U_{1л.ном}$ , В	$\omega_{ном}$ , рад/с	$\eta_{ном}$	$\cos \varphi_{ном}$	$s_{ном}$
АИР160М8	11	380	76,58	0,87	0,75	0,025
	$R_{1\Gamma}$ , Ом	$R_{2\Gamma}$ , Ом	$X_{1\Gamma}$ , Ом	$X_{2\Gamma}$ , Ом	$X_k$ , Ом	$X_m$ , Ом
	0,565	0,266	1,114	1,542	2,655	17,131
АИР200М8	$P_{ном}$ , кВт	$U_{1л.ном}$ , В	$\omega_{ном}$ , рад/с	$\eta_{ном}$	$\cos \varphi_{ном}$	$s_{ном}$
	18,5	380	0,885	0,885	0,84	0,026
	$R_{1\Gamma}$ , Ом	$R_{2\Gamma}$ , Ом	$X_{1\Gamma}$ , Ом	$X_{2\Gamma}$ , Ом	$X_k$ , Ом	$X_m$ , Ом
	0,331	0,151	0,754	1,044	1,799	15,087
АИР200L8	$P_{ном}$ , кВт	$U_{1л.ном}$ , В	$\omega_{ном}$ , рад/с	$\eta_{ном}$	$\cos \varphi_{ном}$	$s_{ном}$
	22	380	76,42	0,885	0,84	0,027
	$R_{1\Gamma}$ , Ом	$R_{2\Gamma}$ , Ом	$X_{1\Gamma}$ , Ом	$X_{2\Gamma}$ , Ом	$X_k$ , Ом	$X_m$ , Ом
	0,303	0,142	0,683	0,878	1,561	15,126
АSI250 S75-8	$P_{ном}$ , кВт	$U_{1л.ном}$ , В	$\omega_{ном}$ , рад/с	$\eta_{ном}$	$\cos \varphi_{ном}$	$s_{ном}$
	37	400	76,97	0,92	0,81	0,02
	$R_{1\Gamma}$ , Ом	$R_{2\Gamma}$ , Ом	$X_{1\Gamma}$ , Ом	$X_{2\Gamma}$ , Ом	$X_k$ , Ом	$X_m$ , Ом
	0,106	0,075	0,373	0,514	0,887	7,646
АSI250 M75-8	$P_{ном}$ , кВт	$U_{1л.ном}$ , В	$\omega_{ном}$ , рад/с	$\eta_{ном}$	$\cos \varphi_{ном}$	$s_{ном}$
	45	400	76,97	0,924	0,81	0,02
	$R_{1\Gamma}$ , Ом	$R_{2\Gamma}$ , Ом	$X_{1\Gamma}$ , Ом	$X_{2\Gamma}$ , Ом	$X_k$ , Ом	$X_m$ , Ом
	0,08	0,062	0,31	0,428	0,738	6,349
ЭДТ16-117М	$P_{ном}$ , кВт	$U_{1л.ном}$ , В	$\omega_{ном}$ , рад/с	$\eta_{ном}$	$\cos \varphi_{ном}$	$s_{ном}$

Двигатель	Параметры					
		16	750	298,45	0,84	0,85
	$R_{1Г}, \text{ОМ}$	$R_{2Г}, \text{ОМ}$	$X_{1Г}, \text{ОМ}$	$X_{2Г}, \text{ОМ}$	$X_k, \text{ОМ}$	$X_m, \text{ОМ}$
	1,497	1,416	2,605	3,597	6,201	67,343
ЭДТ45-103М1	$P_{ном}, \text{кВт}$	$U_{1л.ном}, \text{В}$	$\omega_{ном}, \text{рад/с}$	$\eta_{ном}$	$\cos \varphi_{ном}$	$s_{ном}$
	45	1400	296,88	0,81	0,83	0,055
	$R_{1Г}, \text{ОМ}$	$R_{2Г}, \text{ОМ}$	$X_{1Г}, \text{ОМ}$	$X_{2Г}, \text{ОМ}$	$X_k, \text{ОМ}$	$X_m, \text{ОМ}$
	2,413	1,868	2,891	3,993	6,884	68,414

Для расчета коэффициентов  $k_{\partial y}^U$  по формуле (73) для каждого электродвигателя необходимо знать параметры Т-образной схемы замещения и начальные значения проекций потокоцеплений  $\Psi_{1x0}$ ,  $\Psi_{1y0}$ ,  $\Psi_{2x0}$  и  $\Psi_{2y0}$  при номинальной нагрузке. Для этого необходимо произвести моделирование уравнений двигателей, например, в программе Matlab Simulink. Параметры двигателей, необходимые для моделирования, сведены в таблицу 13.

Таблица 4.5 – Параметры, необходимые для моделирования электродвигателей центробежных насосов и станков-качалок

Двигатель	Параметры					
		$R_1, \text{ОМ}$	$R_2', \text{ОМ}$	$L_1, \text{ГН}$	$L_2', \text{ГН}$	$L_0, \text{ГН}$
АИР160М8	0,531	0,234	0,0579	0,0589	0,0546	4
	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$\frac{L_0}{L_1}$	$\frac{L_0}{L_2'}$	$\frac{3ZL_0}{2\Delta}$	$J, \text{кгм}$
	0,0138	0,0319	0,9425	0,9265	757	0,18
АИР200М8	$R_1, \text{ОМ}$	$R_2', \text{ОМ}$	$L_1, \text{ГН}$	$L_2', \text{ГН}$	$L_0, \text{ГН}$	$Z_n$
	0,315	0,137	0,0489	0,0497	0,0467	4
	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$\frac{L_0}{L_1}$	$\frac{L_0}{L_2'}$	$\frac{3ZL_0}{2\Delta}$	$J, \text{кгм}$
	0,0163	0,038	0,9533	0,9393	1100	0,4
АИР200L8	$R_1, \text{ОМ}$	$R_2', \text{ОМ}$	$L_1, \text{ГН}$	$L_2', \text{ГН}$	$L_0, \text{ГН}$	$Z_n$
	0,29	0,13	0,0503	0,0507	0,0482	4
	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$\frac{L_0}{L_1}$	$\frac{L_0}{L_2'}$	$\frac{3ZL_0}{2\Delta}$	$J, \text{кгм}$
	0,0156	0,0352	0,9586	0,9495	1262	0,45
АИ250 S75-8	$R_1, \text{ОМ}$	$R_2', \text{ОМ}$	$L_1, \text{ГН}$	$L_2', \text{ГН}$	$L_0, \text{ГН}$	$Z_n$
	0,101	0,068	0,0255	0,0258	0,0243	4
	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$\frac{L_0}{L_1}$	$\frac{L_0}{L_2'}$	$\frac{3ZL_0}{2\Delta}$	$J, \text{кгм}$

	0,0251	0,0379	0,9556	0,9423	2230	1,11
ASI250 M75-8	$R_1, \text{ОМ}$	$R_2', \text{ОМ}$	$L_1, \text{ГН}$	$L_2', \text{ГН}$	$L_0, \text{ГН}$	$Z_n$
	0,076	0,056	0,0212	0,0215	0,0202	4
	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$\frac{L_0}{L_1}$	$\frac{L_0}{L_2'}$	$\frac{3ZL_0}{2\Delta}$	$J, \text{кгм}$
	0,0278	0,0382	0,9555	0,9422	2681	0,14
ЭДТ16-117М	$R_1, \text{ОМ}$	$R_2', \text{ОМ}$	$L_1, \text{ГН}$	$L_2', \text{ГН}$	$L_0, \text{ГН}$	$Z_n$
	1,442	1,312	0,2225	0,2251	0,2145	2
	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$\frac{L_0}{L_1}$	$\frac{L_0}{L_2'}$	$\frac{3ZL_0}{2\Delta}$	$J, \text{кгм}$
	0,0126	0,014	0,9641	0,9528	79	0,05
ЭДТ45-103М1	$R_1, \text{ОМ}$	$R_2', \text{ОМ}$	$L_1, \text{ГН}$	$L_2', \text{ГН}$	$L_0, \text{ГН}$	$Z_n$
	2,324	1,938	0,1485	0,1511	0,1399	2
	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$\frac{L_0}{L_1}$	$\frac{L_0}{L_2'}$	$\frac{3ZL_0}{2\Delta}$	$J, \text{кгм}$
	0,0086	0,0117	0,961	0,949	71,4	0,12

Расчетные модели погружных электродвигателей и электродвигателей станков-качалок, подключенных к рассматриваемой отходящей линии представлены на рисунках 30 – 36. Они позволили определить начальные значения  $\Psi_{1x0}$ ,  $\Psi_{1y0}$ ,  $\Psi_{2x0}$  и  $\Psi_{2y0}$  и рассчитать значения  $k_{\text{дв}}^U$  для каждого электродвигателя (таблица 14).

Таблица 4.6 – Проекция потокосцеплений  $\Psi_{1x0}$ ,  $\Psi_{1y0}$ ,  $\Psi_{2x0}$  и  $\Psi_{2y0}$  статора и ротора, полученные в процессе моделирования, и расчетные значения коэффициентов  $k_{\text{дв}}^U$  рассматриваемых электродвигателей

Двигатель	Параметры				
	$\Psi_{1x0}, \text{Вс}$	$\Psi_{1y0}, \text{Вс}$	$\Psi_{2x0}, \text{Вс}$	$\Psi_{2y0}, \text{Вс}$	$k_{\text{дв}}^U, \text{рад/Вс}$
АИР160М8	3,05	-2,147	2,842	-2,717	0,004
АИР200М8	2,97	-2,535	2,796	-2,464	0,0035
АИР200L8	2,952	-2,553	2,789	-2,493	0,0043
ASI250 S75-8	3,062	-2,768	2,886	-2,688	0,0039
ASI250 M75-8	3,051	-2,785	2,874	-2,704	0,0037
ЭДТ16-117М	1,353	-1,276	0,998	-1,443	0,0847
ЭДТ45-103М1	2,518	-2,312	1,908	-2,596	0,0561

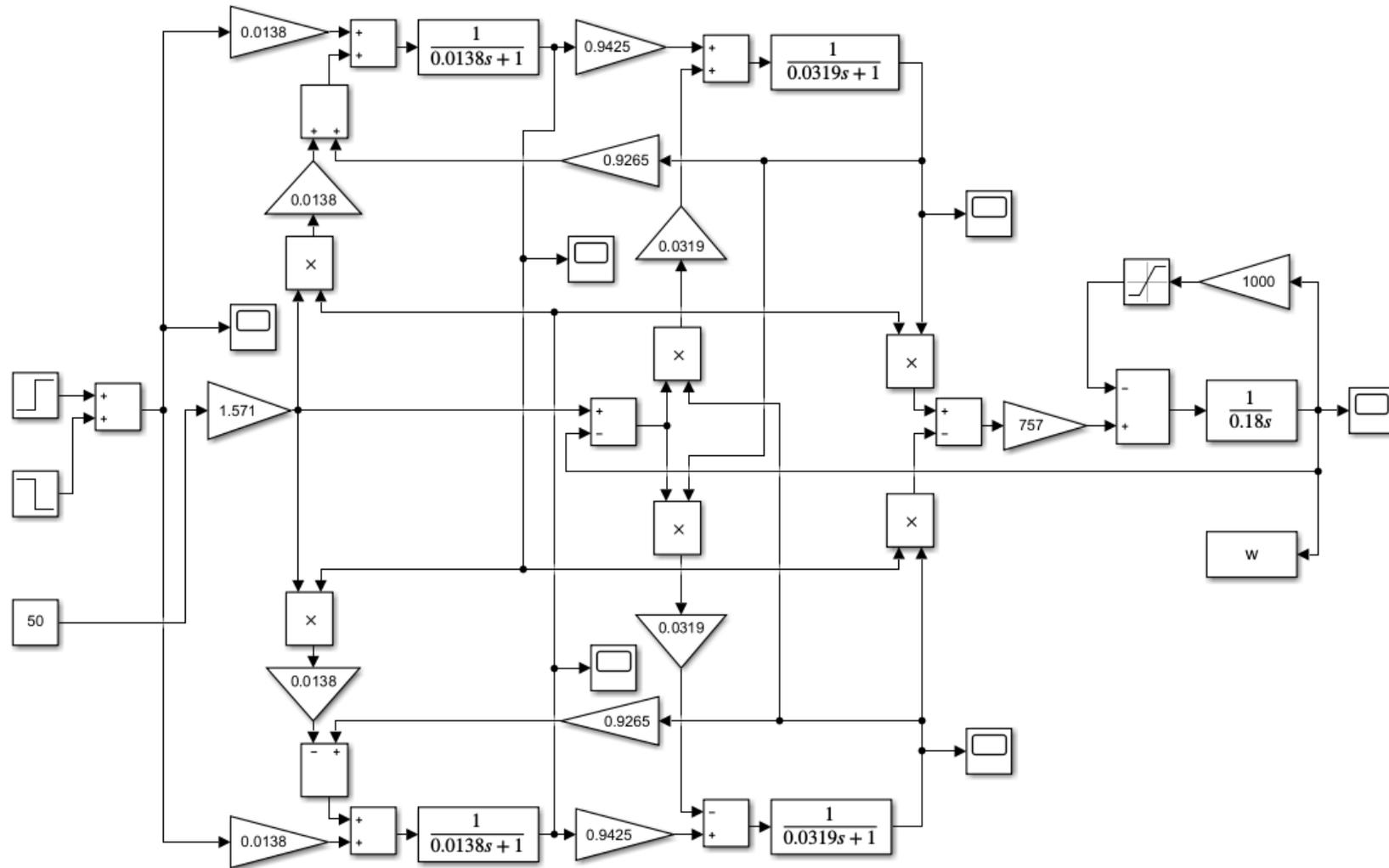


Рисунок 30 – Расчетная модель электродвигателя АИР160М8

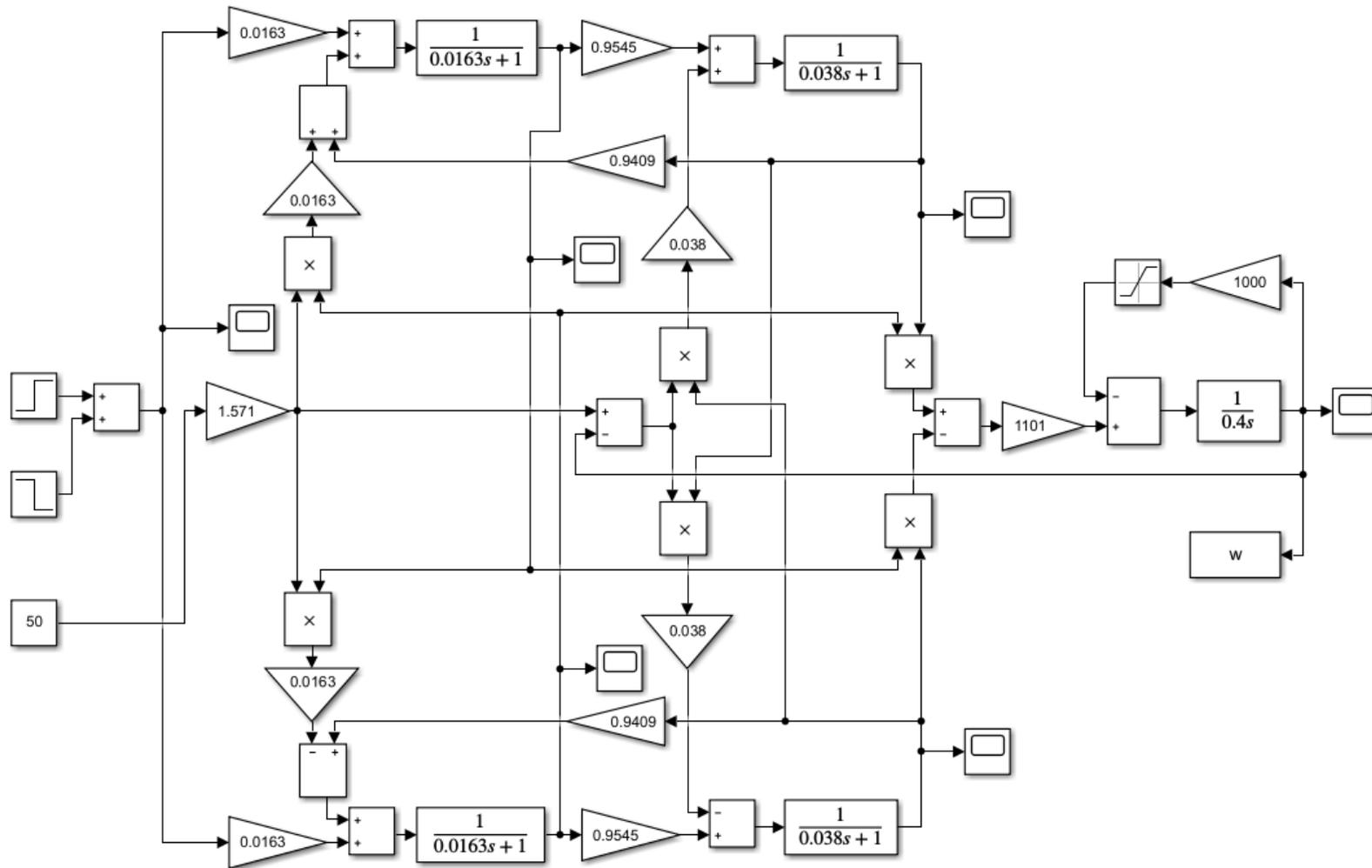


Рисунок 31 – Расчетная модель электродвигателя АИР200М8

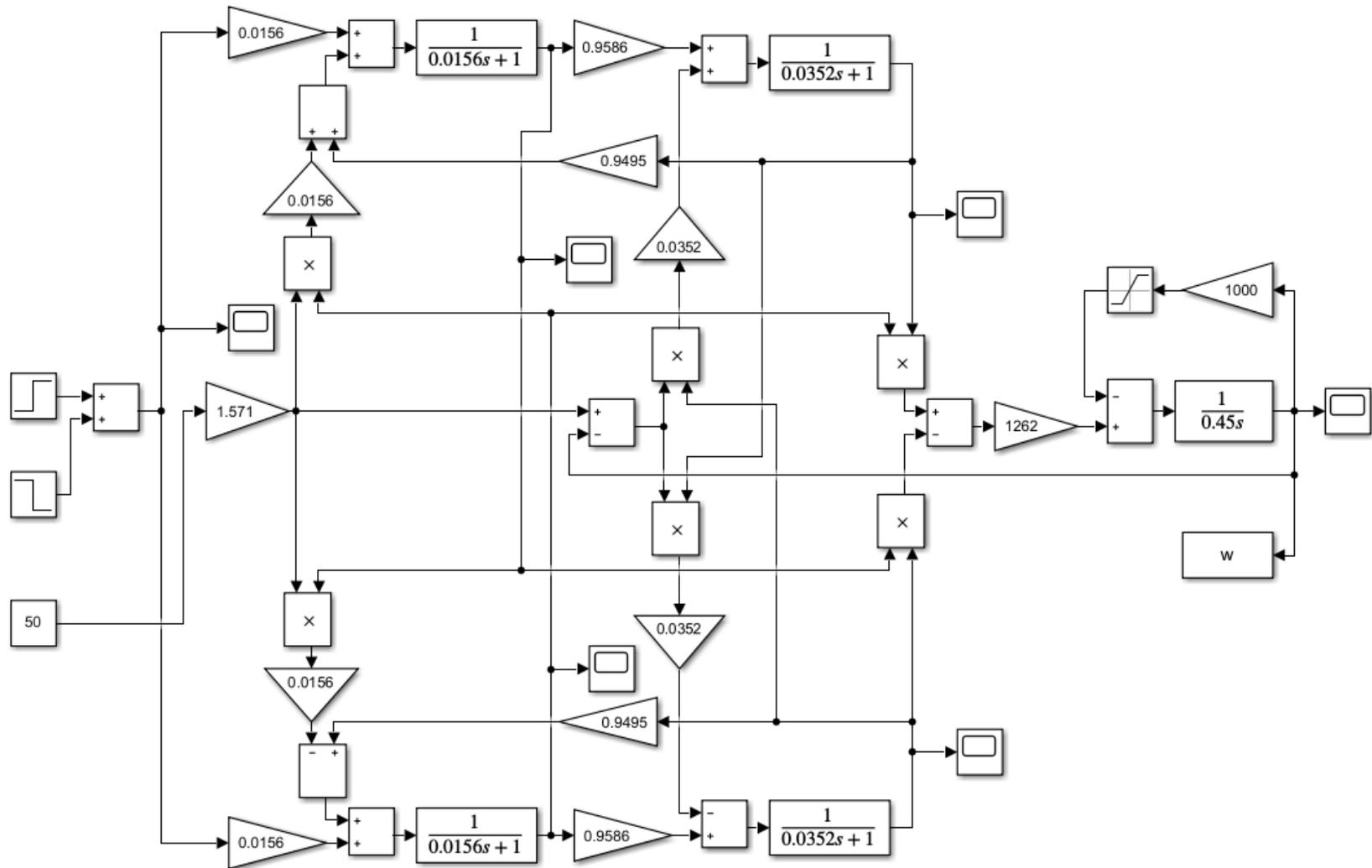


Рисунок 32 – Расчетная модель электродвигателя AIP200L8

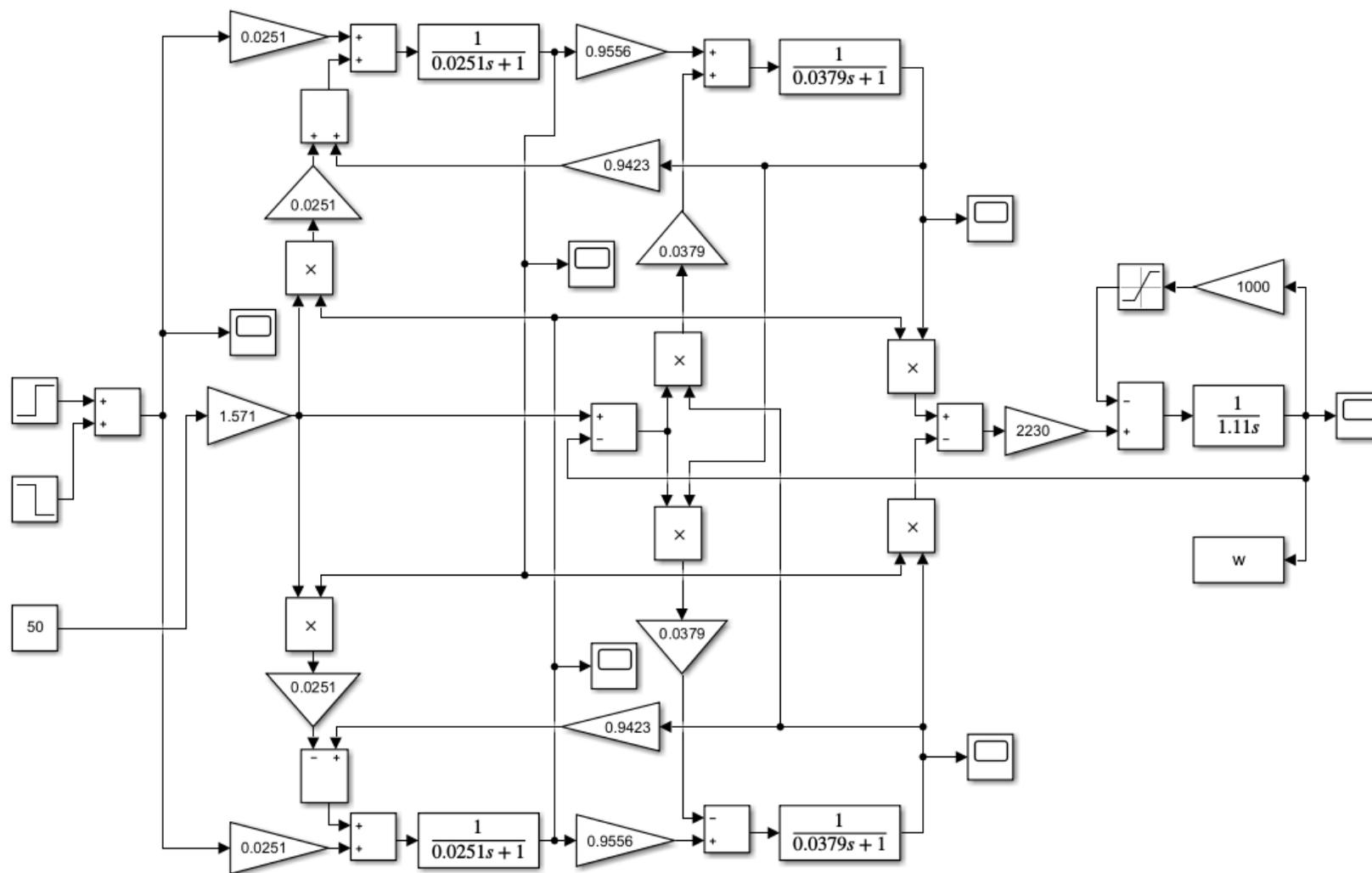


Рисунок 33 – Расчетная модель электродвигателя ASI250 S75-8

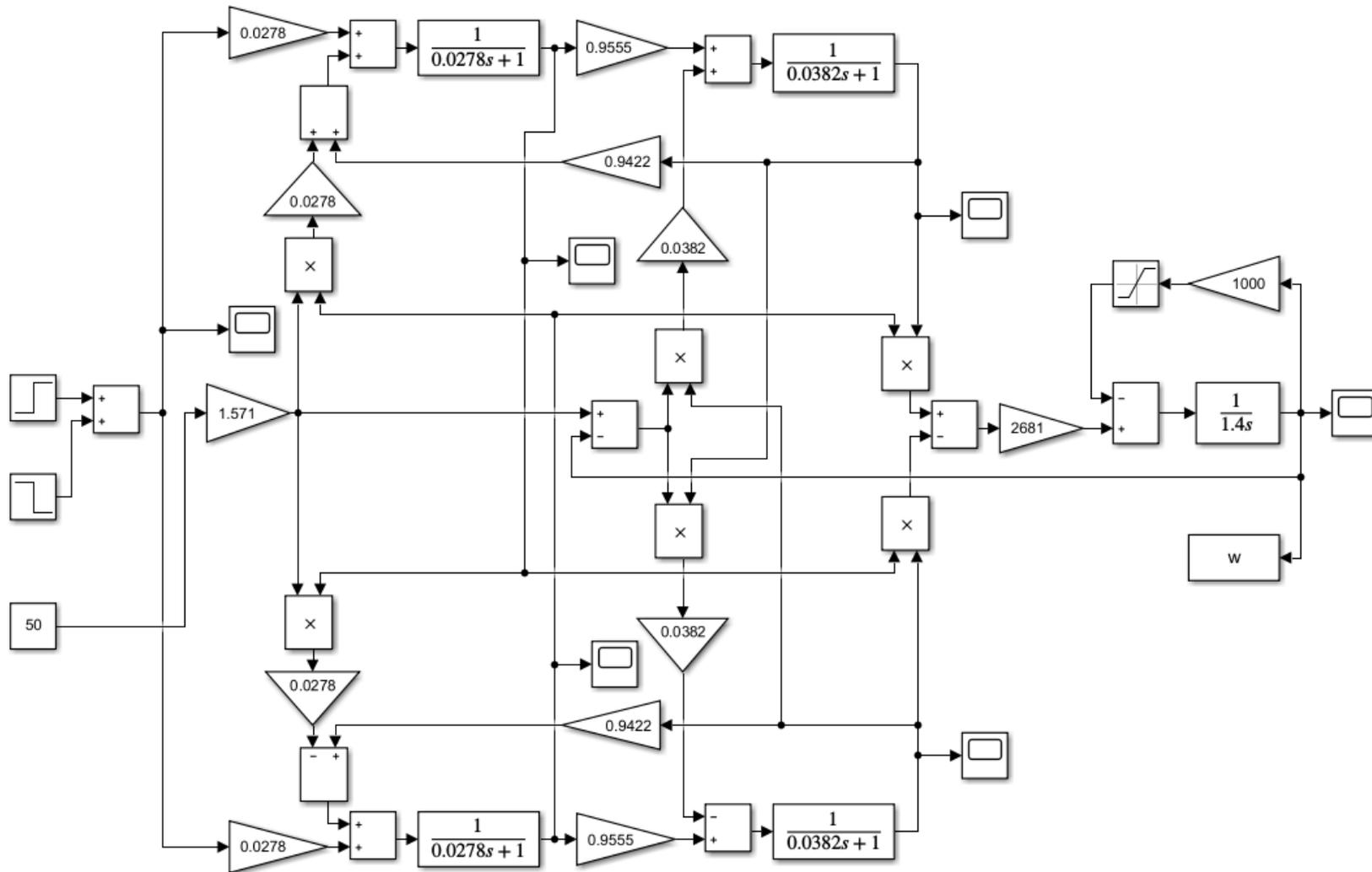


Рисунок 34 – Расчетная модель электродвигателя ASI250 M75-8

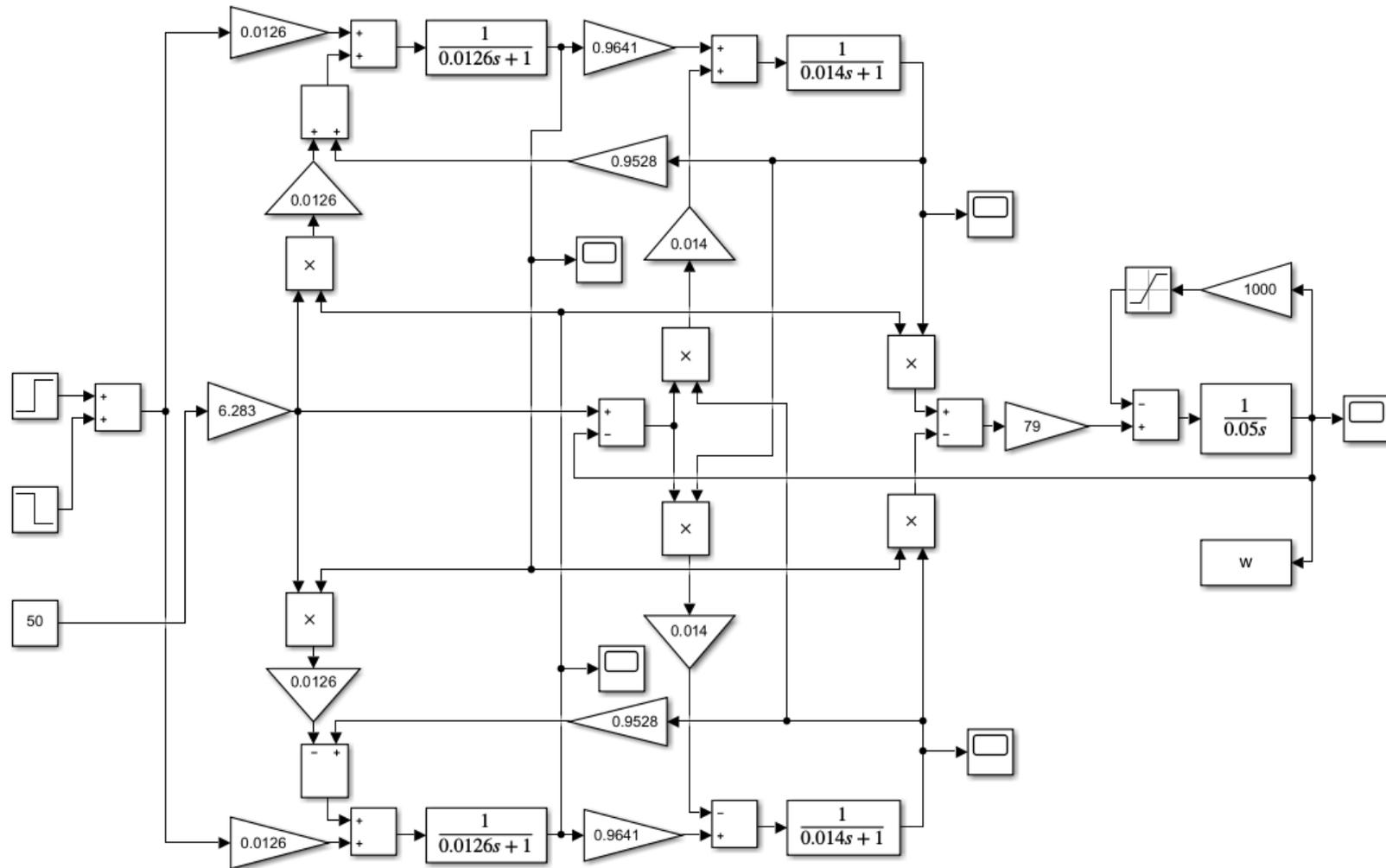


Рисунок 35 – Расчетная модель погружного электродвигателя ЭДТ16-117М

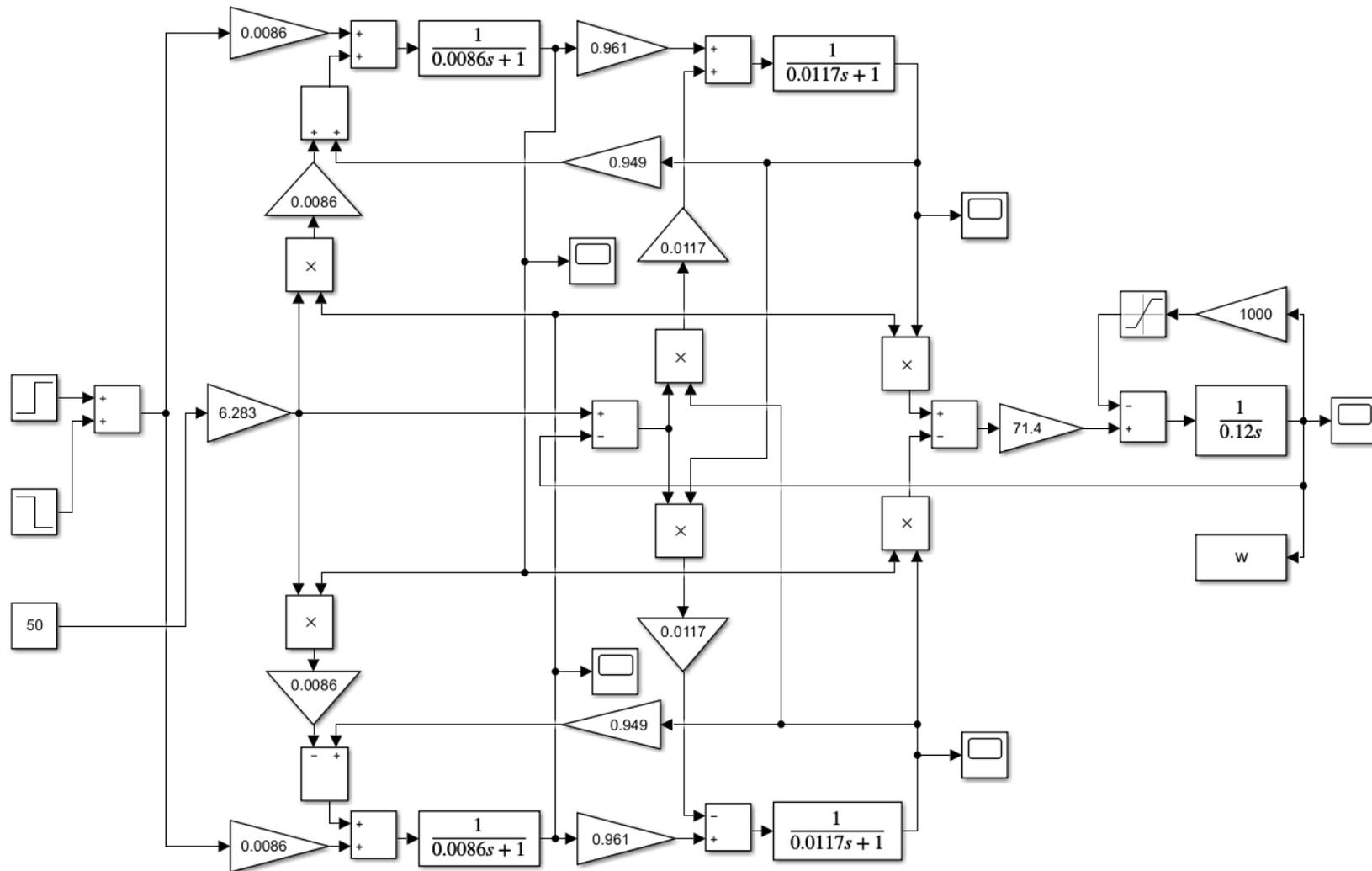


Рисунок 36 – Расчетная модель погружного электродвигателя ЭДТ45-103М1

Значения коэффициентов  $k_M$  для центробежных насосов можно рассчитать по формуле

$$k_M = \frac{\rho g H_{нас} Q_{нас}}{86400 \eta_{нас} \omega_{нас}^3}, \quad (149)$$

исходя из параметров рабочей точки насоса, а именно, напора  $H_{нас}$ , подачи (равного дебиту скважины)  $Q_{нас}$ , коэффициента полезного действия  $\eta_{нас}$ , скорости вращения  $\omega_{нас}$  и плотности добываемой жидкости  $\rho$ . Для скважин 2.1, 5.1 и 6 с погружными центробежными насосами эти данные приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Значения  $H_{нас}$ ,  $Q_{нас}$ ,  $\eta_{нас}$ ,  $\omega_{нас}$ ,  $\rho$  и  $k_M$  для скважин 2.1, 5.1 и 6 с погружными центробежными насосами

Скважина	$H_{нас}$ , м	$Q_{нас}$ м <sup>3</sup> /сут.	$\eta_{нас}$	$\omega_{нас}$ , рад/с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$k_M$ , Нмс <sup>2</sup> /рад <sup>2</sup>
2.1	1595	87	0,456	304,7	1067	$1,303 \cdot 10^{-3}$
5.1	1195	30	0,316	304,7	1032	$4,69 \cdot 10^{-4}$
6	1330	130	0,484	304,7	1036	$1,486 \cdot 10^{-3}$

Для определения коэффициента  $k_{M2}$  и момента  $M_0$  необходимо знать тип плунжерного насоса, глубину его спуска  $H_{сн}$ , производительность насоса  $Q_{нас}$ , плотность добываемой жидкости  $\rho$  и общий коэффициент передачи редуктора совместно с ременной передачей  $i_{ред}$  и радиуса кривошипа  $r_{кр}$  станка качалки. Тогда по формулам [88] можно рассчитать вес штанги и столба жидкости в насосно-компрессорных трубах и с учетом действия противовеса и найти величину  $M_0$ , а также рассчитать силы сухого и вязкого трения [86] и в итоге определить коэффициент  $k_{M2}$  плунжерного насоса. Такие данные для скважин 1, 2.2, 3.1, 3.2, 3.3, 4, 5.2 и 5.3 со станками качалками и результаты расчета представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Тип плунжерного насоса, параметры  $H_{сн}$ ,  $Q_{нас}$ ,  $\rho$  и значения  $k_{M2}$  и  $M_0$  для скважин 1, 2.2, 3.1, 3.2, 3.3, 4, 5.2 и 5.3 со станками качалками

Скважина	Тип насоса	$H_{сн}$ , м	$Q_{нас}$ м <sup>3</sup> /сут.	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$i_{ред}$	$r_{кр}$ , м	$k_{M2}$ , Нмс/рад	$M_0$ , Нм
1	НВ1С-32-30-15	1050	11,0	1041	224	0,75	0,098	28,0
2.2	НВ1С-29-30-25	1600	8,0	1014	167	0,75	0,126	54,5
3.1	НВ1С-38-30-20	1000	31,0	1027	116	1,00	0,401	170,0
3.2	НВ1С-38-30-20	1000	27,9	1029	116	1,00	0,400	171,0
3.3	НВ1С-38-30-20	1100	3,1	1030	116	1,00	0,400	171,0
4	НВ1Б-32-12-15	1400	5,8	1039	116	0,40	0,060	35,0
5.2	НВ1С-38-30-20	700	23,0	1086	133	0,75	0,190	82,0
5.3	НВ1С-38-25-20	1500	20,0	1108	116	0,83	0,282	228,0

### 4.3 Расчет оптимального значения напряжения промышленной подстанции, питающей рассматриваемую отходящую линию, и оценка адекватности расчета

Разработанный алгоритм расчета (рисунок 25) довольно просто реализуется в любых математических программных продуктах, например, в программе MathCAD. Листинг программы для расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию, принципиальная схема которой представлена на рисунке 29, приведен в Приложении 1. Эта программа позволила рассчитать напряжение  $U_{ПС}$ , потребляемую мощность  $P_{ПС}$ ,  $Q_{ПС}$ ,  $S_{ПС}$ , суммарные потери мощности  $\Delta P$  в кабельных и воздушных линиях и трансформаторах, коэффициент эффективности нефтяной добычи  $k_{эф}$  и удельные затраты электроэнергии  $E_{аз}$  и  $E_{пз}$  при вариации напряжения  $U_{1ПЭД6}$  скважины 6 в пределах от  $0,9U_{1ПЭД6.ном}$  до  $1,1U_{1ПЭД6.ном}$  (таблица 17).

Данные таблицы показывают, что оптимальным с позиций любого критерия оптимизации является напряжение промышленной подстанции  $U_{ПС.оптм} = 5506$  В. При этом потери в воздушных и кабельных линиях и трансформаторах составят  $\Delta P = 18,84$  кВт, потребляемые от промышленной подстанции активная и полная мощности будут равны  $P_{ПС} = 221,4$  кВт,

$S_{ПС} = 315,3$  кВА, дебит всех скважин составит  $Q = 377,7$  м<sup>3</sup>/сут., удельные затраты электроэнергии на добычу кубометра жидкости составят  $E_{аэ} = 14,07$  кВт·час/м<sup>3</sup>,  $E_{нэ} = 20,03$  кВА/м<sup>3</sup>, а коэффициент эффективности использования активной мощности будет равен  $k_{эф} = 1,706$  м<sup>3</sup>/сут·кВт.

Таблица 17 – Зависимости параметров энергетической эффективности от напряжения промышленной подстанции для гипотетической отходящей линии, приведенной на рисунке 29

$\Delta U_{ПЭД6}$ , %	-10	-5	-2,5	0	2,5	5	10
$\Delta P$ , кВт	<b>18,84</b>	19,00	19,60	20,21	21,20	21,46	22,16
$U_{ПС}$ , В	5506	5786	5928	6069	6216	6357	6640
$P_{ПС}$ , кВт	<b>221,4</b>	223,4	225,0	226,5	228,5	229,8	232,5
$Q_{ПС}$ , кВАр	224,4	241,9	259,6	273,4	294,0	304,0	325,9
$Q$ , м <sup>3</sup> /сут	377,7	379,2	379,9	380,6	381,4	382,2	383,7
$k_{эф} = \frac{Q}{P_{ПП}}$ , м <sup>3</sup> /сут·кВт	<b>1,706</b>	1,697	1,689	1,680	1,669	1,663	1,650
$E_{аэ} = \frac{24P_{ПС}}{Q}$ , кВт·час/м <sup>3</sup>	<b>14,07</b>	14,14	14,21	14,28	14,38	14,43	14,54
$S_{ПС}$ , кВА	<b>315,3</b>	329,3	343,5	355,1	372,4	381,1	400,3
$E_{нэ} = \frac{24S_{ПП}}{Q}$ , кВА·час/м <sup>3</sup>	<b>20,03</b>	20,85	21,70	22,39	23,43	23,93	25,04

Анализ данных таблицы показывает, что при оптимальном напряжении наблюдается снижение потребляемой активной мощности на 5 % по сравнению с напряжением  $U_{ПС}$ , обеспечивающим напряжение на самом удаленном двигателе  $1,1U_{1ПЭД6,ном}$ . При этом удельные затраты электроэнергии на добычу кубометра жидкости снижаются на 3,3 %. Снижение потребления полной мощности оказывается еще внушительней и составляет 30 %, а удельные затраты полной мощности уменьшаются на 25 %. Следовательно, регулирование напряжения промышленной подстанции и обеспечение оптимального напряжения повышает энергетическую эффективность электротехнического комплекса добычи нефти.

На промышленной подстанции, питающей рассматриваемую отходящую линию установлен масляный трансформатор с РПН типа ТМН-2500/35-У1 с номинальной мощностью 2500 кВА. Диапазон регулирования устройства РПН данного трансформатора  $\pm 4 \times 2,5\%$ , т.е.  $\pm 10\%$  от номинального напряжения, которое составляет 6300 В. Зависимость выходного напряжения промышленной подстанции  $U_{HH}$  от степени регулирования  $j$  приведена в таблице 18.

Таблица 4.9 – Зависимость выходного напряжения промышленной подстанции  $U_{HH}$  от степени регулирования  $j$

$j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
$U_{HH}$ , В	<b>5670</b>	5857	6015	6172	6300	6458	6615	6773	6930

Ближайшим к оптимальному напряжению  $U_{ПС.оптим} = 5506$  В является напряжение промышленной подстанции  $U_{ПС} = 5670$  В. Разработанный алгоритм, приведенный на рисунке 27 позволяет рассчитать уточненные значения потребления электрической энергии и дебит скважин при этом уровне напряжения:  $\Delta P = 18,9$  кВт,  $P_{ПС} = 222,6$  кВт,  $S_{ПС} = 323$  кВА,  $Q = 378,6$  м<sup>3</sup>/сут.,  $E_{аз} = 14,11$  кВт·час/м<sup>3</sup>,  $E_{нэ} = 20,47$  кВА/м<sup>3</sup>,  $k_{эф} = 1,701$  м<sup>3</sup>/сут·кВт. Полученные результаты показывают незначительное увеличение потребления электроэнергии относительно минимальных значений.

Для оценки адекватности полученных результатов, с помощью разработанного алгоритма, произведем расчет оптимального напряжения промышленной подстанции для рассматриваемой реальной отходящей линии в случае вывода скважины 2.1 в ремонт. Результаты расчета приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Зависимости параметров энергетической эффективности от напряжения промышленной подстанции для гипотетической отходящей линии, приведенной на рисунке 29, при выводе скважины 2.1 в ремонт

$\Delta U_3, \%$	-10	-5	-2,5	0	2,5	5	10
$\Delta P, \text{кВт}$	<b>13,43</b>	13,61	14,16	14,32	15,23	15,45	16,02
$U_{ПС}, \text{В}$	5489	5769	5912	6052	6199	6340	6623
$P_{ПС}, \text{кВт}$	<b>172,2</b>	173,5	174,6	175,3	176,9	177,7	179,5
$Q_{ПС}, \text{кВАр}$	184,4	199,8	216,3	224,5	243,7	252,3	271,4
$Q, \text{м}^3/\text{сут}$	290,6	291,6	292,1	292,6	293,1	293,6	294,6
$k_{эф} = \frac{Q}{P_{ПШ}}, \text{м}^3/\text{сут}\cdot\text{кВт}$	<b>1,688</b>	1,681	1,673	1,668	1,657	1,652	1,641
$E_{аз} = \frac{24P_{ПС}}{Q}, \text{кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^3$	<b>14,22</b>	14,28	14,35	14,39	14,48	14,53	14,62
$S_{ПС}, \text{кВА}$	<b>225,3</b>	264,6	278,0	284,8	301,1	308,6	325,4
$E_{нэ} = \frac{24S_{ПШ}}{Q}, \text{кВА}\cdot\text{час}/\text{м}^3$	<b>20,84</b>	21,78	22,84	23,37	24,66	25,23	26,51

Анализ данных таблицы показывает, что оптимальным является напряжение промышленной подстанции  $U_{ПС} = 5489 \text{ В}$ . При этом ожидаемое потребление активной мощности от промышленной подстанции равно  $P_{ПС} = 172,2 \text{ кВт}$ . С учетом дискретности регулирования напряжения трансформатора ТМН-2500/35-У1 на ступени  $U_{ПС} = 5670 \text{ В}$  потребление активной мощности будет составлять  $P_{ПС} = 173 \text{ кВт}$ . Следовательно, при напряжении промышленной подстанции  $U_{ПС} = 5670 \text{ В}$  при выводе скважины 2.1 в ремонт ожидаемое снижение потребление активной мощности составит  $\Delta P_{ПС} = 49,6 \text{ кВт}$ .

Сравним результаты расчета с фактическими данными, полученными с промышленной подстанции при выводе скважины 2.1 в ремонт. Фактическое потребление активной мощности, полученные со счётчика, за 17.11.2023 г. и 18.11.2023 г. представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Суточное потребление активной мощности по отходящей линии 90-10 90.10 (в кВт)

Дата \ Время	Время												
	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
17.11.2023 г.	164,52	163,44	163,08	163,44	163,44	163,08	163,08	163,44	163,08	163,8	164,52	164,34	164,16
18.11.2023 г.	164,52	164,16	164,16	163,8	163,44	163,98	164,52	165,6	164,52	164,88	164,52	139,32	115,56

Дата \ Время	Время											
	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
17.11.2023 г.	164,16	164,16	164,16	163,8	163,62	163,44	163,08	163,8	164,52	164,16	164,16	164,52
18.11.2023 г.	102,96	116,64	115,56	115,56	115,92	116,28	116,28	116,64	116,64	116,64	117,00	116,64

Достоверно известно, что 17.11.2023 г. скважина 2.1 эксплуатировалась, но неизвестно точно, какие скважины еще находились в рабочем режиме. Также известно, что скважина 2.1 в 11 часов 18.11.2023 г. была выведена в ремонт. На рисунках 37 и 38 представлены графики потребления активной мощности за двое суток.

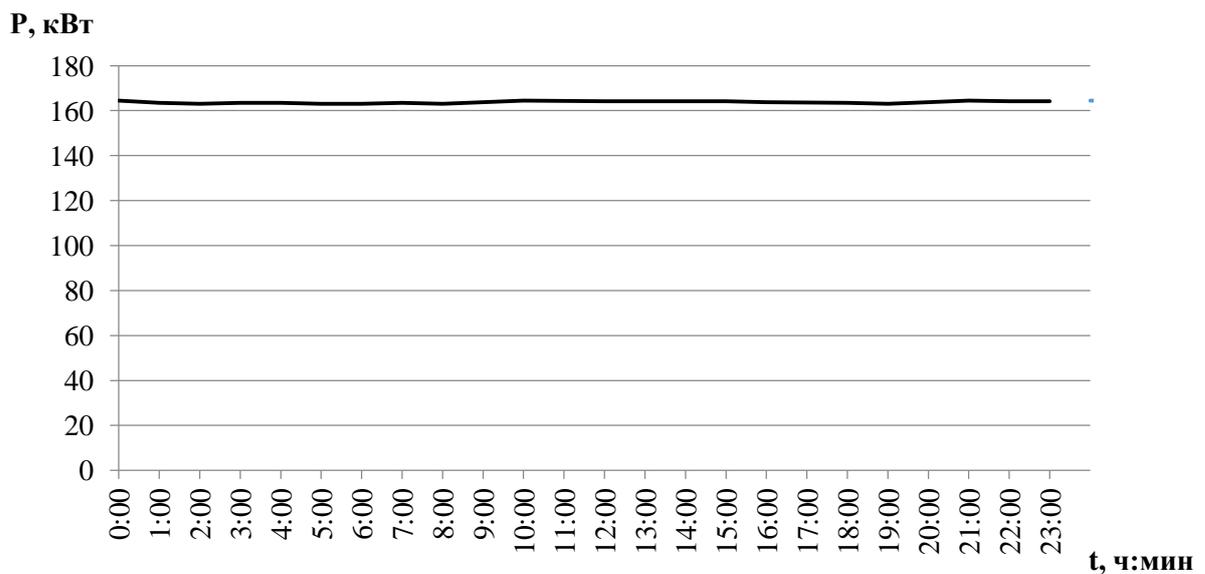


Рисунок 37 – График потребления активной мощности от промышленной подстанции 17.11.2023 г.

Фактическое снижение потребления активной мощности при выводе скважины 2.1 в ремонт составило  $\Delta P_{ПС.факт} = 48,24$  кВт. Следовательно, расхождение результатов расчета с фактическими экспериментальными данными не превышает 2,8 %.

Также было рассчитано по формулам, приведенным во второй и третьей главах, потребление электрической энергии станцией управления погружным центробежным насосом скважины 2.1 для случая, когда на повышающий трансформатор подается линейное напряжение 380 В, а фазное напряжение составляет 220 В. В этом случае расчетное потребление активной мощности станцией управления будет равно  $P_{cy} = 47,7$  кВт.

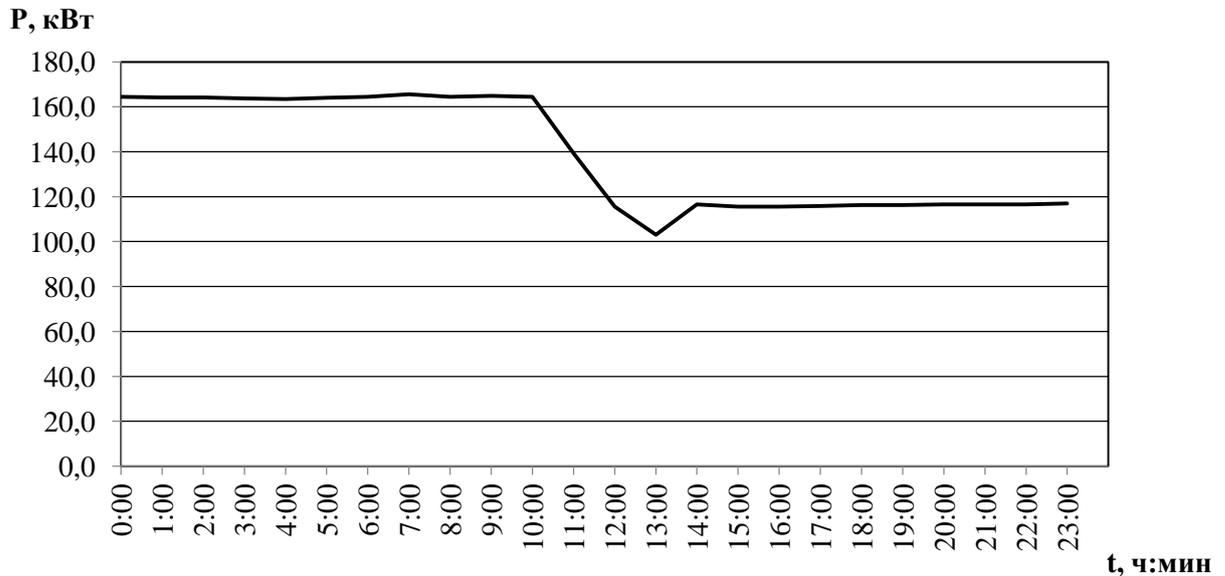


Рисунок 38 – График потребления активной мощности от промышленной подстанции 18.11.2023 г.

Фактические данные со станции управления скважины 2.1 показывают, что при фазном напряжении 220 В, потребление активной мощности равно  $P_{cy.факт} = 46,7$  кВт. Следовательно, расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет 2,14 %.

Анализ фактических и расчетных данных позволяет сделать вывод, что основной причиной погрешности расчета является определение величины  $k_M$  центробежного насоса. Если для насоса скважины 2.1 при расчете взять ве-

личину  $k_M = 1,271 \cdot 10^{-3}$  вместо  $k_M = 1,303 \cdot 10^{-3}$ , то погрешность расчета сведется к нулю.

Следовательно, повышение точности расчета оптимального напряжения и ожидаемого потребления электрической энергии от промышленной подстанции можно добиться путем коррекции исходных данных в соответствии с показаниями датчиков напряжения и мощности станций управления погружными насосами.

Подводя итог вышесказанному, можно сформулировать универсальную методику расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию с электротехническими комплексами добывающих скважин, и ожидаемого потребления электрической энергии с учетом дискретности регулирования напряжения трансформаторами с РПН следующим образом:

1. Анализ напорных характеристик погружных центробежных насосов, определение параметров рабочей точки насоса и расчет коэффициентов  $k_M$ , необходимых для определения скорости вращения погружного двигателя.

2. Анализ параметров скважины, оснащенной плунжерными насосами, кинематических характеристик станков-качалок и станков с цепным приводом и расчет коэффициентов  $k_{M2}$  и момента  $M_{0AD}$ , необходимых для расчета средней скорости асинхронных двигателей, приводящих в движение такого типа насосы.

3. Подготовка данных по техническим характеристикам погружных и наземных асинхронных двигателей, включая параметры Г-образных и Т-образных схем замещения двигателей.

4. Моделирование погружных и наземных асинхронных двигателей при номинальной нагрузке и определение начальных значений проекций потоковцеплений  $\psi_{1x0}$ ,  $\psi_{1y0}$ ,  $\psi_{2x0}$  и  $\psi_{2y0}$  статора и ротора на оси системы координат, вращающейся вместе с магнитным полем статора при частоте питающего напряжения 50 Гц.

5. Расчет коэффициентов  $k_{dy}^U$ , связывающих изменение скорости вращения асинхронных двигателей с изменением фазного напряжения статора.

6. Подготовка данных по трансформаторам, преобразователям частоты станций управления погружными насосами, воздушным и кабельным линиям, входящим в состав отходящей линии и электротехнических комплексов добывающих скважин.

7. Расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с помощью разработанного алгоритма, приведенного на рисунке 25.

8. Анализ дискретности регулирования напряжения трансформатором с РПН, установленного на промышленной подстанции, и выбор ступени регулирования с ближайшим большим относительно оптимального напряжением.

9. Расчет ожидаемых значений потребляемой от промышленной подстанции мощности, объемов добываемой из скважин жидкости и определение удельных затрат электроэнергии при добыче нефти с помощью разработанного алгоритма, приведенного на рисунке 27.

#### **4.4 Выводы по четвертой главе**

1. Разработанный алгоритм позволяет производить расчет ожидаемой суммарной потребляемой от промышленной подстанции мощности электротехническими комплексами добывающих скважин с учетом дискретности регулирования напряжения трансформаторами с РПН.

2. Приведенный пример расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для реальной отходящей линии, показывает, что существенно важным является процесс подготовки исходных данных, включающим моделирование асинхронных двигателей при номинальной нагрузке и номинальном напряжении.

3. Доказано, что регулирование напряжения промышленной подстанции и обеспечение оптимального напряжения повышает энергетическую эффективность механизированной добычи нефти. Действительно, расчет для кон-

кретного примера отходящей линии показал снижение потребляемой активной мощности на 5 %, а удельных затрат электроэнергии на добычу кубометра жидкости – на 3,3 %. При этом снижение потребления полной мощности составляет 30 %, а удельных затрат полной мощности – 25 %.

4. Сравнение результатов расчета ожидаемой суммарной потребляемой активной мощности с фактическими данными показывает, что расхождение не превышает 2,8 %.

5. Погрешность расчета ожидаемой суммарной потребляемой мощности может быть снижена за счет коррекции исходных данных в соответствии с показаниями датчиков напряжения и мощности станций управления погружными насосами.

6. Сформулированная универсальная методика расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию с электротехническими комплексами добывающих скважин, и ожидаемого потребления электрической энергии с учетом дискретности регулирования напряжения трансформаторами с РПН, представляет собой четкую последовательность действий и расчетов с помощью разработанных алгоритмов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Найденны граничные условия, при которых удельные затраты электроэнергии на добычу кубометра жидкости погружным центробежным насосом будут равны как в случае использования преобразователя частоты, так и без него, что позволяет обоснованно подходить к выбору комплектации станции управления.

2. Получены аналитические зависимости для расчета скорости и потребляемой мощности асинхронными двигателями штанговой скважинной насосной установки и погружного центробежного насоса при вариации питающего напряжения, которые учитывают особенности напорных характеристик насосов, кинематики исполнительного механизма и преобразователей частоты, обеспечивающие расхождение результатов расчета с фактическими данными с промышленной подстанции менее 2,2 %.

3. Разработана методика и алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, которая учитывает влияние особенностей напорных характеристик центробежных, плунжерных насосов и преобразователей частоты на потребление активной и реактивной мощности электротехническими комплексами добывающих скважин и позволяет снизить потребление активной мощности до 6 %, что значительно повышает энергетическую эффективность добычи нефти.

4. Разработан алгоритм, позволяющий производить расчет ожидаемой суммарной потребляемой от промышленной подстанции мощности электротехническими комплексами добывающих скважин с учетом дискретности регулирования напряжения трансформаторами с РПН, причем расхождение расчетных значений с фактическими данными с промышленной подстанции при их сравнении не превышает 2,8 %.

5. Произведен расчет оптимального напряжения промышленной подстанции для реальной отходящей линии, который показал, что его применение позволяет снизить потребление активной мощности до 5 %, а удельных затрат электроэнергии на добычу кубометра жидкости – на 3,3 %. При этом возможное снижение потребления полной мощности составляет 30 %.

### Библиографический список

1. Нурбосынов, Д.Н. Методы расчетов и математическое моделирование режима напряжения и электропотребления в установившихся и переходных процессах. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 1999.
2. Нурбосынов, Д.Н., Табачникова Т.В. Методика определения рациональных уровней напряжения электротехнического комплекса предприятия нефтегазодобывающей промышленности // Нефть и газ Западной Сибири: Материалы международной научно-технической конференции. Тюмень: Феликс, 2005. – Т. 2. – С. 157-158.
3. Нурбосынов Д.Н., Табачникова Т.В., Рюмин Е.В., Махт А.Д. Совершенствование математической модели и метода расчета по определению оптимальных энергетических параметров узла электрической нагрузки // Известия вузов. Электромеханика, 2012. – № 3. – С. 64-70.
4. Стариков А.В., Табачникова Т.В., Казанцев А.А., Косорлуков И.А. Алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки, 2021. – Т. 29. – № 4. – С. 116-131.
5. Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I. Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage // 2020 International Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), IEEE Xplore, 2020. – Pp. 1-5.
6. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Основы управления режимами энергосистем по частоте и активной мощности, по напряжению и реактивной мощности: учеб. пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2010. – 96 с.
7. Меньшов, Б.Г. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности / Б.Г. Меньшов, И.И. Суд – М.: Недра, 1984. – 416 с.
8. Конюхова, Е.А. Влияние параметров режимов работы асинхронных двигателей на их статические характеристики / Е.А. Конюхова, В.И.

Михайлов // Промышленная энергетик, 1990. – № 10.

9. Абрамович, Б.Н. Регулирование уровней напряжения на промышленных предприятиях в часы максимума нагрузки / Б.Н. Абрамович, П.М. Каменев, Д.Н. Нурбосынов. – М.: ЦНИЭИуголь, 1987 г.

10. Абрамович, Б.Н. Техническая и экономическая эффективность регулирования напряжения на ГПП угольных шахт / Б.Н. Абрамович, Д.Н. Нурбосынов, П.М. Каменев // В кн.: Совершенствование методов разведки и добычи полезных ископаемых крайнего севера. – Сыктывкар, 1988 г.

11. Абрамович, Б.Н. Создание автоматизированной системы контроля и учета энергоресурсов для объединения «Татнефть»/ Б.Н. Абрамович, Д.Н. Нурбосынов, П.М. Каменев, В.Я. Чаронов // В кн.: II-ой Международный симпозиум Автоматическое управление энергообъектами ограниченной мощности. – Ленинград, 1992 г.

12. Голованов, А.П. Об оптимизации режимов работы энергосистемы / А.П. Голованов // Электричество, 1992. – № 12. – С. 10-14.

13. Хачатрян, В.С. К теории оптимизации режимов больших электроэнергетических систем / В.С. Хачатрян, М.А. Балабекян // Электричество, 1980. – № 10. – С. 55-57.

14. Хачатрян, В.С. Оптимизация режима большой электроэнергетической системы методом декомпозиции по активным мощностям электрических станций / В.С. Хачатрян, М.А. Мнацаканян, К.В. Хачатрян, С.Э. Григорян // Электричество, 2008. – № 2. – С. 10-22.

15. Хачатрян, В.С. Оптимизация структуры объединенной электроэнергетической системы с применением метода декомпозиции / В.С. Хачатрян, А.В. Темурджян // Электричество, 1983. – № 8. – С. 8-13.

16. Бартоломей, П.И. Оптимизация режимов энергосистем методами аппроксимирующего и сепарабельного программирования / П.И. Бартоломей, Н.И. Грудинин // Изв. Ак. наук. Энергетика, 1993. – № 1. – С. 72-77.

17. Арзамасцев, Д.А. АСУ и оптимизация режимов энергосистем / Д.А. Арзамасцев, П.И. Бартоломей, А.М. Холян. – М.: Высшая школа, 1983. – 208 с.

18. Арзамасцев, Д.А. Расчет оптимального распределения реактивной мощности методом последовательного эквивалентирования / Д.А. Арзамасцев, В.А. Игуменцев // Электричество, 1976. – № 1. – С. 70-72.

19. Герасименко, А.А. Оптимизация режимов электрических систем на основе метода приведенного градиента / А.А. Герасименко, А.В. Липес // Электричество, 1989. – № 9. – С. 1-7.

20. Горнштейн, В.М. Методы оптимизации режимов энергосистем / В.М. Горнштейн, Б.П. Мирошниченко, А.В. Пономарев и др.; под ред. В.М. Горнштейна. – М.: Энергия, 1981. – 336 с.

21. Идельчик, В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

22. Веников, В.А. О методах решения многокритериальных оптимизационных задач электроэнергетики с неопределенными величинами / В.А. Веников, И.А. Будзко, М.С. Левин, Е.Л. Блохина, В.А. Петров // Электричество, 1987. – № 2. – С. 1-7.

23. Веников, В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник для вузов / В.А. Веников, В.Г. Журавлев, Т.А. Филиппова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

24. Солдаткина, Л.А. К вопросу о критериях качества автоматического регулирования режима энергосистем. // Электричество, 1959. – № 12. – С. 4-11.

25. Регулирование напряжения в электрических сетях / Н.А. Мельников, Л.А. Солдаткина. Энергия, 1968. – 152 с.

26. Хакимьянов, М.И. Повышение энергоэффективности и оптимизация режимов работы электроприборов в нефтедобывающей промышленности. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Уфимский государственный авиационный университет. – Уфа, 2018. – 230 с.

27. Жежеленко, И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

28. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в элек-

трических системах: учебник для электроэнергетических специальностей вузов / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

29. Абрамович, Б.Н. Электроснабжение нефтегазовых предприятий: учебное пособие / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов. Санкт-Петербургский государственный горный институт. – СПб, 2008. – 81 с.

30. Ершов М.С., Яризов А.Д. Электрификация предприятий нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 2000. – 72 с.

31. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

32. Строев В.А., Рокотян И.С. / Методы математической оптимизации в задачах систем электроснабжения: Учеб.пособие по курсу Мат.задачи электроэнергетики. – М.: Изд-во МЭИ, 1993 г.

33. Ершов М.С., Яризов А.Д. Энергосберегающий электропривод технологических установок трубопроводного транспорта газа, нефти и нефтепродуктов. – Москва: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. – 245 с. – ISBN 978-5-91961-013-7.

34. Кудрин, Б.И. Мысли, идеи, гипотезы // Веников В. Нефть, газ, уголь, электричество. – М.: Знание, сер. Техника, 1982. – № 8. – С. 54-55.

35. Кудрин Б.И., Родина Л.С., Овчинников А.П. Распределение турбоагрегатов электростанций по повторяемости // Оптимизация и повышение надежности систем электроснабжения. Сб. науч. тр. № 210. – М.: Изд-во МЭИ, 1989. – С. 98-105.

36. Афанасьев Ю.В., Кудрин Б.И. О применении теории вероятностей для целей оптимального размещения системы учета и контроля электропотребления // Тез. докл. V науч.-техн. конф. «Технико-экономические проблемы оптимизации режимов электропотребления промышленных предприятий» (Миасс, 12-15 октября 1989 г.). – Челябинск: Свердловск. горн. ин-т, 1989. – С. 53-56.

37. Кудрин Б.И., Фуфаев В.В., Никифоров А.Г. Управление потреблением реактивной мощности в узле нагрузки на основе устойчивых распреде-

лений // Тез. докл. науч.-техн. конф. «Технико-экономические проблемы оптимизации режимов электроэнергетики и её качества» (Свердловск, 25-26 сентября 1986 г.). – Свердловск: Свердлов. горн. ин-т, 1986. – С. 33-35.

38. Конюхова, Е.А. Методика определения параметров режимов электрической сети промышленного предприятия, обеспечивающих желаемый уровень потребления активной мощности средствами регулирования напряжения. – Казань, 1998.

39. Конюхова Е.А., Васильев В.М. Выбор мощности компенсирующих устройств в системе электроснабжения промышленного предприятия с учетом вероятностного характера реактивной нагрузки. // Труды МЭИ, 1983. – Вып. 605.

40. Конюхова, Е.А., Электроснабжение объектов: Учебное пособие для студ. учреждений, 2002.

41. Конюхова, Е.А., Регулирование электропотребления промышленного предприятия при взаимосвязанном выборе режима напряжения и компенсации реактивной мощности: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук: 05.09.03 / Моск. энергет. ин-т.

42. Мищенко, И.Т. Особенности работы погружных центробежных электронасосов на многокомпонентных смесях: Автореферат дисс. на соискание учен. степ. канд. техн. наук / Моск. ин-т нефтехим. и газовой промышленности им. И.М. Губкина. – М., 1965. – 23 с.

43. Мищенко, И.Т. Выбор оптимальных типоразмера и режима работы штанговой глубиннонасосной установки: Учеб. пособие для студентов. – М.: МИНХИГП, 1981. – 80 с.

44. Мищенко, И.Т. Некоторые вопросы насосной эксплуатации нефтяных скважин. – М., 1968. – 107 с.

45. Мищенко, И.Т. Некоторые вопросы совершенствования механизированных способов добычи нефти. – М.: ВНИИОЭНГ, 1978. – 45 с.

46. Мукани, Э.Б. Режимы работы систем электроснабжения объектов нефтегазовых месторождений: автореферат диссертации на соискание ученой

степени кандидата технических наук: специальность 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы. – Москва, 2011. – 25 с.

47. Швецова, Л.В. Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса добывающей скважины с высоковязкой нефтью: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: специальность 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы / Самара, 2016. – 20 с.

48. Табачникова, Т.В. Оптимизация режимов работы электротехнического комплекса предприятий нефтегазодобывающей промышленности / Дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Санкт-Петербург, 2006. – 117 с.

49. Грачева Е.И., Табачникова Т.В., Швецова Л.В. Методика расчета оптимального напряжения центра питания отходящей линии промышленной подстанции нефтегазодобывающего предприятия // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2021. – № 5. – С. 56-70.

50. Костоломов Е.М., Шибанов С.В. Результаты работы высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов насосных агрегатов перекачки нефти на объектах ОАО «Сургутнефтегаз» / Е.М. Костоломов, С.В. Шибанов // Экспозиция Нефть Газ 5/Н октябрь 2009. – С. 33-35.

51. «Электон». Нефтепромышленное оборудование. Системы управления // Технический каталог. – М.: ЗАО «Электон». – 75 с.

52. Указания по проектированию компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / Инструктивные материалы Главэнергонадзора Минэнерго СССР. М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 55.

53. Мартюшев, Д.Н. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН // Инженерная практика, 2011. – № 6. – С. 72-77.

54. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов / А.С. Анучев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.

55. Аржанов М.Ф., Кагарманов И.И., Мельников А.П., Карпенко И.Н., Кравец Ю.А. Справочник нефтяника. – Самара: ОАО «Самаранефтегаз», 2007. – 432 с.

56. Мордвинов В.А., Турбаков М.С. К методике выбора электро-

центробежных насосов при эксплуатации нефтедобывающих скважин // Вестник ПГТУ. Геология, геоинформационные системы, горно-нефтяное дело. – Пермь: ПГТУ, 2009. – № 4. – С. 58-66.

57. Погружное оборудование и комплексный сервис // Технический каталог. – М.: Группа компаний «Римера», 2014. – № 3. – 203 с.

58. Гольдштейн В.Г., Казанцев А.А., Инаходова Л.М., Андреев А.Ю. Анализ современных конструкций силовых трансформаторов в распределительных сетях и системах электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. Новочеркасск: Изд. «ЮРГПУ», 2016. – № 6. – С. 87-90.

59. Kazantsev A.A., Inahodova L.M., Yudin A.A. Research of Electric Modes when Using Innovative Designs of Power Transformers in Power Supply Systems of Oil and Gas Companies // Proceedings - International Ural Conference on Measurements, UralCon, 2023. – pp. 34-38.

60. Дашевский А.В., Кагарманов И.И., Зейгман Ю.В., Шамаев Г.А. Справочник инженера по добыче нефти. – Стрежевой: ООО «Печатник», 2002. – 280 с.

61. Вечеркин, М.В. Разработка и исследование пускорегулирующих устройств высоковольтного электропривода вентиляторной станции: дис. ... канд. техн. наук / М.В. Вечеркин – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет, 2006. – 119 с.

62. Живаева В.В., Стариков А.В., Полежаев Д.Ю. Энергоэффективный подход к выбору оборудования установки погружного насоса // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. Самара: СамГТУ, 2017. – № 2 (54). – С. 130-138.

63. Чаронов, В.Я. Энергетические показатели режимов работы электрооборудования УЭЦН и способы их улучшения / В.Я. Чаронов, Б.Н. Абрамович, О.В. Иванов, Д.Н. Нурбосынов // Нефтяное хозяйство, 1985. – № 3. – С. 43-46.

64. Абдуллин, Д.Ф. Удельное потребление электроэнергии электроприводами основных механизмов нефтегазодобывающих промыслов /

Д.Ф. Абдуллин, М.И. Хакимьянов // Инновационное направление развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования: межвузовский сборник научных трудов / редкол.: В.А. Шабанов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2012. – С. 256-260.

65. А.с. №1185490 (СССР). Устройство защиты от перенапряжений и субгармонических колебаний установок продольной емкостной компенсации. // Абрамович Б.Н., Ананьев К.А., Иванов О.В., Макурова Л.В., Нурбосынов Д.Н. Оpubл. в Б.И., 1985. – № 38.

66. Антоневиц, В.Ф. Анализ вычислительных функций микропроцессорной информационно-измерительной системы учета и контроля электроэнергии / В.Ф. Антоневиц, А.Л. Гуртовцев, М.Е. Гурчик // Электромеханика, 1983. – № 12.

67. Живаева В.В., Стариков А.В., Стариков В.А. Применение частотно-регулируемого электропривода для вывода скважины на стационарный режим / Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – Самара: СамГТУ, 2009. – № 1(23). – С. 142-151.

68. Патент России № 2370673, МКИ F04D 15/00, F04D 13/10. Система управления погружным электроцентробежным насосом / В.В. Живаева, А.В. Стариков, В.А. Стариков (Россия) // Оpubл. 20.10.2009. – Бюл. № 29.

69. Патент России № 2181829, МКИ7 E 21 B 43/00, F 04 D 13/10. Способ вывода скважины, оборудованной установкой электроцентробежного насоса с частотно-регулируемым приводом, на стационарный режим работы / В.М. Люстрицкий, С.А. Шишков (Россия) // Оpubл. 27.04.2002. – Бюл. № 12.

70. Стариков, В.А. Автоматизация технологического процесса вывода скважины на стационарный режим работы после капитального ремонта: дис. ... канд. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2010. – 137 с.

71. Стариков А.В., Полежаев Д.Ю. Вывод нефтяной скважины на стационарный режим работы без датчика динамического уровня / Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – Самара: СамГТУ, 2014. – № 4 (44). – С. 191-197.

72. Костоломов Е.М., Шибанов С.В. Результаты работы высоко-

вольтных частотно-регулируемых электроприводов насосных агрегатов перекачки нефти на объектах ОАО «Сургутнефтегаз» // Экспозиция Нефть Газ, 2009. – № 5. – С. 33-35.

73. Стариков А.В., Живаева В.В., Полежаев Д.Ю. Энергоэффективный подход к выбору оборудования установки погружного насоса // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки, 2017. – № 2 (54). – С. 130-138.

74. ГОСТ Р 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ: дата введения 1995-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Изд. официальное. Минск: Стандартиформ, 1993. – С. 20-21.

75. Григорьев В.И., Киреева Э.А., Миронов В.А., Чохонелидзе А.Н., Григорьев В.В. Справочная книга электрика: справ. издание. М.: Колос, 2004. – 97 с.

76. Стариков А.В., Казанцев А.А., Косорлуков И.А. Обоснование целесообразности применения частотных преобразователей в станциях управления погружными центробежными насосами // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки, 2022. – Т. 30. – № 4. – С. 115-126.

77. Расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с учетом особенностей частотных преобразователей станций управления погружными насосами // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд. СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2022. – № 3(36). – С. 66-73.

78. Тарасов, В.П. Энергосберегающий дизайн УЭЦН // Инженерная практика, 2010. – № 3.– С. 26-32.

79. Масляницын, А.П. Автоматизация технологического процесса добычи нефти погружными центробежными насосами: дис. канд. техн. наук. Самара: СамГАСА, 1999.

80. Сабуров А.Г., Гуляева Ю.Н. Основы гидравлики гидравлических машин и гидропривода. – Санкт-Петербург: СПбГУиНПТ, 2008. – 178 с.

81. Гарифуллина, А.Р. Рациональное управление реактивной мощностью электротехнических комплексов добывающей скважины и отходящей линии нефтегазодобывающего предприятия: дис. ...канд. техн. наук: 09.05.03 / Гарифуллина А.Р. – Санкт-Петербург, 2012. – 123 с.

82. Михайлов, О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.

83. Стариков А.В., Лисин С.Л., Табачникова Т.В., Косорлуков И.А., Беляева О.С. Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки, 2019. – № 4(64). – С. 155-167.

84. Табачникова, Т.В. Индивидуальная компенсация реактивной мощности электротехнического комплекса добывающей скважины с электроцентробежным насосом / Т.В. Табачникова, Р.И. Гарифуллин, Э.Д. Нурбосынов, А.В. Махт // Промышленная энергетика, 2015. – № 2. – С. 44-47.

85. Ивановский, В.Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // Инженерная практика, 2011. – № 6. – С. 18-26.

86. Афанасьев, Н.В. Совершенствование режима напряжения и электропотребления в условиях предприятий нефтедобычи / Н.В. Афанасьев, И.А. Чернявская, Д.Н. Нурбосынов // Нефть Татарстана, 1999. – № (1-2). – С. 64-67.

87. Сидоркин, Д.И. Техника и технологии добычи нефти и газа / Учебно-методическое пособие к практическим занятиям. – Уфа, 2014.

88. Стариков А.В., Козловский В.Н., Казанцев А.А., Косорлуков И.А. Влияние дискретности регулирования напряжения промышленной подстанции на потребляемую мощность электротехническими комплексами погружных насосов // Известия Тульского государственного университета. Сер.: Технические науки, 2023. – Вып. 9. – С. 393-403.

Листинг программы для расчета оптимального напряжения по разработанному универсальному алгоритму промышленной подстанции, питающей реальную отходящую линию на нефтяном промысле

9 Скважина 6

$$U_{l9} := 1400 \quad U_{n9} := \frac{U_{l9}}{\sqrt{3}} \quad U_{n9} = 808.29 \times 10^0 \quad \cos\phi_9 := 0.83 \quad \sin\phi_9 := 0.055$$

$$\eta_9 := 0.81 \quad P_{29} := 45000 \quad I_{n9} := \frac{P_{29}}{3 \cdot U_{n9} \cdot \eta_9 \cdot \cos\phi_9} \quad I_{n9} = 27.603 \times 10^0$$

$$n_{m9} := 2835 \quad n_{09} := 3000 \quad \omega_{09} := \frac{\pi n_{09}}{30} \quad \omega_{09} = 314.159 \times 10^0$$

$$\omega_{nd9} := \frac{\pi n_{m9}}{30} \quad \omega_{nd9} = 296.881 \times 10^0$$

$$X_{k9} := 6.884 \quad X_{m9} := 68.414 \quad R_{29} := 1.868 \quad K_{du9} := 0.0561$$

$$\Delta U_9 := -0.1 \cdot U_{n9} \quad \Delta U_9 = -80.829 \times 10^0$$

$$U_{ped9} := U_{n9} + \Delta U_9 \quad U_{ped9} = 727.461 \times 10^0$$

$$K_{m9} := 1.486 \times 10^{-3}$$

$$M_{n9} := \frac{P_{29}}{\omega_{nd9}} \quad M_{n9} = 151.576 \times 10^0 \quad M_{09} := 9.81 - 0.45 = 4.415 \times 10^0$$

$$\omega_9 := \frac{\sqrt{M_{n9}^2 + 4 \cdot K_{m9} \cdot (\omega_{09} - \omega_{nd9} - K_{du9} \cdot \Delta U_9) \cdot [M_{n9} \cdot \omega_{09} + K_{du9} \cdot \Delta U_9 \cdot M_{09} - (\omega_{09} - \omega_{nd9}) M_{09}] - M_{n9}}}{2 K_{m9} \cdot (\omega_{09} - \omega_{nd9} - K_{du9} \cdot \Delta U_9)}$$

$$s_{9U} := \frac{\omega_{09} - \omega_9}{\omega_{09}} \quad s_{9U} = 61.23 \times 10^{-3} \quad \omega_9 = 294.923 \times 10^0$$

$$P_{ped9} := \frac{K_{m9} \cdot \omega_9^3 + M_{09} \cdot \omega_9}{\eta_9} \quad P_{ped9} = 48.668 \times 10^3$$

$$I_{d9} := \frac{U_{ped9}}{\sqrt{X_{k9}^2 + \left(\frac{R_{29}}{s_{9U}}\right)^2}} \quad I_{d9} = 23.26 \times 10^0$$

$$Q_{ped9} := 3 \cdot \left( I_{d9}^2 \cdot X_{k9} + \frac{U_{ped9}^2}{X_{m9}} \right) \quad Q_{ped9} = 3.43792 \times 10^4$$

$$S_{ped9} := \sqrt{P_{ped9}^2 + Q_{ped9}^2} \quad S_{ped9} = 59.586 \times 10^3$$

$$\begin{aligned}
R_{k19} &:= 1.098 & X_{k19} &:= 0.14 \\
\Delta P_{xt19} &:= 0.22 & \Delta P_{xt29} &:= 0.31 & S_{nt19} &:= 63 & U_{nt19} &:= 0.4 \\
\Delta P_{kt19} &:= 1.28 & \Delta P_{kt29} &:= 2.4 & S_{nt29} &:= 100 & U_{nt29} &:= 0.4 \\
U_{kt19} &:= 4.5 & U_{kt29} &:= 5.5 & k_{t19} &:= 15 & k_{t29} &:= \frac{1}{3.65} \\
I_{xt19} &:= 2.4 & I_{xt29} &:= 2.2 & & & & \\
\Delta Q_{xt19} &:= S_{nt19} \cdot \frac{I_{xt19}}{100} & \Delta Q_{xt29} &:= S_{nt29} \cdot \frac{I_{xt29}}{100} & \Delta Q_{xt19} &= 1.512 \times 10^0 & \Delta Q_{xt29} &= 2.2 \times 10^0 \\
\Delta Q_{kt19} &:= S_{nt19} \cdot \frac{U_{kt19}}{100} & \Delta Q_{kt29} &:= S_{nt29} \cdot \frac{U_{kt29}}{100} & \Delta Q_{kt19} &= 2.835 \times 10^0 & \Delta Q_{kt29} &= 5.5 \times 10^0 \\
\Delta P_{k19} &:= \frac{[(P_{ped9})^2 + (Q_{ped9})^2] \cdot R_{k19}}{3U_{ped9}^2} & & & \Delta P_{k19} &= 2.456 \times 10^3 \\
\Delta Q_{k19} &:= \frac{[(P_{ped9})^2 + (Q_{ped9})^2] \cdot X_{k19}}{3U_{ped9}^2} & & & \Delta Q_{k19} &= 313.098 \times 10^0 \\
P_{tm9} &:= P_{ped9} + \Delta P_{k19} & & & P_{tm9} &= 51.124 \times 10^3 \\
Q_{tm9} &:= Q_{ped9} + \Delta Q_{k19} & & & Q_{tm9} &= 34.692 \times 10^3 \\
S_{tm9} &:= \sqrt{P_{tm9}^2 + Q_{tm9}^2} \\
\cos \varphi_{tm9} &:= \frac{P_{tm9}}{S_{tm9}} & \sin \varphi_{tm9} &:= \frac{Q_{tm9}}{S_{tm9}} & \cos \varphi_{tm9} &= 827.468 \times 10^{-3} & \sin \varphi_{tm9} &= 561.513 \times 10^{-3} \\
\beta_{92} &:= \frac{S_{tm9}}{S_{nt29} \cdot 10^3} & \beta_{92} &= 617.836 \times 10^{-3} & S_{tm9} &= 61.784 \times 10^3 \\
U_{tm9} &:= \sqrt{\left[ \sqrt{3} \cdot U_{ped9} + \frac{(P_{ped9} \cdot R_{k19} + Q_{ped9} \cdot X_{k19})}{\sqrt{3} \cdot U_{ped9}} \right]^2 + \left[ \frac{(P_{ped9} \cdot X_{k19} - Q_{ped9} \cdot R_{k19})}{\sqrt{3} \cdot U_{ped9}} \right]^2} \\
\Delta U_{k19} &:= U_{tm9} - \sqrt{3} \cdot U_{ped9} \\
U_{tm9} &= 1.306 \times 10^3 \\
\Delta U_{k19} &= 46.462 \times 10^0 \\
\Delta P_{t92} &:= 1000 \cdot (\Delta P_{xt29} + \beta_{92}^2 \cdot \Delta P_{kt29}) & \Delta P_{t92} &= 1.226 \times 10^3 \\
\Delta Q_{t92} &:= 1000 \cdot (\Delta Q_{xt29} + \beta_{92}^2 \cdot \Delta Q_{kt29}) & \Delta Q_{t92} &= 4.299 \times 10^3
\end{aligned}$$

$$\Delta St92 := \sqrt{\Delta Pt92^2 + \Delta Qt92^2}$$

$$\Delta St92 = 4.471 \times 10^3$$

$$Ptp9 := Ptm9 + \Delta Pt92$$

$$Ptp9 = 52.35 \times 10^3$$

$$Qtp9 := Qtm9 + \Delta Qt92$$

$$Qtp9 = 38.992 \times 10^3$$

$$Stp9 := \sqrt{Ptp9^2 + Qtp9^2}$$

$$Stp9 = 65.275 \times 10^3$$

$$Rt92 := \frac{\Delta Pkt29 \cdot 10^3}{Snt29^2} \cdot Unt29^2$$

$$Rt92 = 38.4 \times 10^{-3}$$

$$Xt92 := \frac{Unt29^2}{Snt29} \cdot \frac{10Ukt29}{1}$$

$$Xt92 = 88 \times 10^{-3}$$

$$\Delta Ut92 := \frac{kt29^2 \cdot (Rt92 \cdot Ptm9 + Xt92 \cdot Qtm9)}{Utm9}$$

$$\Delta Ut92 = 288.192 \times 10^{-3}$$

$$Utp9 := Utm9 \cdot kt29 + \Delta Ut92$$

$$Utp9 = 358.223 \times 10^0$$

$$\cos \varphi_{tp9} := \frac{Ptp9}{Stp9} \quad \sin \varphi_{tp9} := \frac{Qtp9}{Stp9}$$

$$\cos \varphi_{tp9} = 801.987 \times 10^{-3}$$

$$\sin \varphi_{tp9} = 597.341 \times 10^{-3}$$

$$\beta_{91} := \frac{Stp9}{Snt19 \cdot 10^3}$$

$$\beta_{91} = 1.036 \times 10^0$$

$$\Delta Pt91 := 1000 \cdot (\Delta Pxt19 + \beta_{91}^2 \cdot \Delta Pkt19)$$

$$\Delta Pt91 = 1.594 \times 10^3$$

$$\Delta Qt91 := 1000 \cdot (\Delta Qxt19 + \beta_{91}^2 \cdot \Delta Qkt19)$$

$$\Delta Qt91 = 4.555 \times 10^3$$

$$\Delta St91 := \sqrt{\Delta Pt91^2 + \Delta Qt91^2}$$

$$\Delta St91 = 4.826 \times 10^3$$

$$Rt91 := \frac{\Delta Pkt19 \cdot 10^3}{Snt19^2} \cdot Unt19^2$$

$$Rt91 = 51.6 \times 10^{-3}$$

$$Xt91 := \frac{Unt19^2}{Snt19} \cdot \frac{10Ukt19}{1}$$

$$Xt91 = 114.286 \times 10^{-3}$$

$$\Delta Ut91 := \frac{Rt91 \cdot Ptp9 + Xt91 \cdot Qtp9}{Utp9}$$

$$\Delta Ut91 = 19.98 \times 10^0$$

$$U_{vtp9} := U_{tp9} \cdot kt_{19} + \Delta U_{t91} \quad U_{vtp9} = 5.393 \times 10^3$$

$$P_{vtp9} := P_{tp9} + \Delta P_{t91} \quad P_{vtp9} = 53.944 \times 10^3$$

$$Q_{vtp9} := Q_{tp9} + \Delta Q_{t91} \quad Q_{vtp9} = 43.547 \times 10^3$$

$$S_{vtp9} := \sqrt{P_{vtp9}^2 + Q_{vtp9}^2} \quad S_{vtp9} = 69.328 \times 10^3$$

$$R_{19} := 0.207 \quad X_{19} := 0.172$$

$$\Delta P_{19} := \frac{(P_{vtp9}^2 + Q_{vtp9}^2) \cdot R_{19}}{U_{vtp9}^2} \quad \Delta P_{19} = 34.204 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{19} := \frac{(P_{vtp9}^2 + Q_{vtp9}^2) \cdot X_{19}}{U_{vtp9}^2} \quad \Delta Q_{19} = 28.42 \times 10^0$$

$$P_6 := P_{vtp9} + \Delta P_{19} \quad P_6 = 53.978 \times 10^3$$

$$Q_6 := Q_{vtp9} + \Delta Q_{19} \quad Q_6 = 43.576 \times 10^3$$

$$U_6 := \sqrt{\left[ U_{vtp9} + \frac{(P_{vtp9} \cdot R_{19} + Q_{vtp9} \cdot X_{19})}{U_{vtp9}} \right]^2 + \left[ \frac{(P_{vtp9} \cdot X_{19} - Q_{vtp9} \cdot R_{19})}{U_{vtp9}} \right]^2} \quad U_6 = 5.397 \times 10^3$$

$$\Delta U_{19} := U_6 - U_{vtp9} \quad \Delta U_{19} = 3.459 \times 10^0$$

$$R_{156} := 0.299 \quad X_{156} := 0.248$$

$$\Delta P_{56} := \frac{(P_6^2 + Q_6^2) \cdot R_{156}}{U_6^2} \quad \Delta P_{56} = 49.405 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{56} := \frac{(P_6^2 + Q_6^2) \cdot X_{156}}{U_6^2} \quad \Delta Q_{56} = 40.978 \times 10^0$$

$$P_{5ped9} := P_6 + \Delta P_{56} \quad P_{5ped9} = 54.028 \times 10^3$$

$$Q_{5ped9} := Q_6 + \Delta Q_{56} \quad Q_{5ped9} = 43.617 \times 10^3$$

$$U_5 := \sqrt{\left[ U_6 + \frac{(P_6 \cdot R_{156} + Q_6 \cdot X_{156})}{U_6} \right]^2 + \left[ \frac{(P_6 \cdot X_{156} - Q_6 \cdot R_{156})}{U_6} \right]^2} \quad U_5 = 5.4018 \times 10^3$$

$$\Delta U_{56} := U_5 - U_6 \quad \Delta U_{56} = 4.993 \times 10^0$$

## 8 Скважина 5.1

$$U_{18} := 750 \quad U_{n8} := \frac{U_{18}}{\sqrt{3}} \quad U_{n8} = 433.013 \times 10^0 \quad \cos\phi_8 := 0.85 \quad \sin_8 := 0.05$$

$$\eta_8 := 0.84 \quad P_{28} := 16000 \quad I_{n8} := \frac{P_{28}}{3 \cdot U_{n8} \cdot \eta_8 \cdot \cos\phi_8} \quad n_{08} := 3000 \quad \omega_{08} := \frac{\pi n_{08}}{30}$$

$$X_{k8} := 6.201 \quad X_{m8} := 67.343 \quad R_{28} := 1.416 \quad K_{du8} := 0.0847 \quad \omega_{08} = 314.159 \times 10^0$$

$$\Delta U_8 := -24.915 \quad \Delta U_8 = -24.915 \times 10^0 \quad K_{m8} := 4.69 \times 10^{-4} \quad I_{n8} = 17.25 \times 10^0$$

$$U_{ped8} := U_{n8} + \Delta U_8 \quad U_{ped8} = 408.098 \times 10^0$$

$$n_{nd8} := 3000 \cdot (1 - \sin_8) \quad n_{nd8} = 2.85 \times 10^3$$

$$\omega_{nd8} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{nd8}}{60} \quad \omega_{nd8} = 298.451 \times 10^0 \quad M_{08} := 9.81 \cdot 0.2 \quad M_{08} = 1.962 \times 10^0$$

$$M_{n8} := \frac{P_{28}}{\omega_{nd8}} \quad M_{n8} = 53.61 \times 10^0$$

$$\omega_8 := \frac{\sqrt{M_{n8}^2 + 4 \cdot K_{m8} \cdot (\omega_{08} - \omega_{nd8} - K_{du8} \cdot \Delta U_8) \cdot [M_{n8} \cdot \omega_{08} + K_{du8} \cdot \Delta U_8 \cdot M_{08} - (\omega_{08} - \omega_{nd8}) M_{08}] - M_{n8}}}{2 K_{m8} \cdot (\omega_{08} - \omega_{nd8} - K_{du8} \cdot \Delta U_8)}$$

$$\omega_8 = 299.523 \times 10^0$$

$$s_{8U} := \frac{\omega_{08} - \omega_8}{\omega_{08}} \quad s_{8U} = 46.59 \times 10^{-3}$$

$$P_{ped8} := \frac{K_{m8} \cdot \omega_8^3 + M_{08} \cdot \omega_8}{\eta_8} \quad P_{ped8} = 15.703 \times 10^3$$

$$I_{d8} := \frac{U_{ped8}}{\sqrt{X_{k8}^2 + \left(\frac{R_{28}}{s_{8U}}\right)^2}} \quad I_{d8} = 13.156 \times 10^0$$

$$Q_{ped8} := 3 \cdot \left( I_{d8}^2 \cdot X_{k8} + \frac{U_{ped8}^2}{X_{m8}} \right) \quad Q_{ped8} = 1.06392 \times 10^4$$

$$S_{ped8} := \sqrt{P_{ped8}^2 + Q_{ped8}^2} \quad S_{ped8} = 18.968 \times 10^3$$

$$R_{k18} := 1.176 \quad X_{k18} := 0.145$$

$$\Delta P_{xt28} := 0.31$$

$$\Delta P_{kt28} := 2.4 \quad S_{nt28} := 100 \quad U_{nt28} := 0.4$$

$$U_{kt28} := 5.5 \quad k_{t18} := 15 \quad k_{t28} := \frac{1}{2.05}$$

$$I_{xt28} := 2.2$$

$$\Delta Q_{xt28} := S_{nt28} \cdot \frac{I_{xt28}}{100} \quad \Delta Q_{xt28} = 2.2 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{kt28} := S_{nt28} \cdot \frac{U_{kt28}}{100} \quad \Delta Q_{kt28} = 5.5 \times 10^0$$

$$\Delta P_{kl8} := \frac{(P_{ped8}^2 + Q_{ped8}^2) \cdot R_{kl8}}{3U_{ped8}^2} \quad \Delta P_{kl8} = 846.802 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{kl8} := \frac{(P_{ped8}^2 + Q_{ped8}^2) \cdot X_{kl8}}{3U_{ped8}^2} \quad \Delta Q_{kl8} = 104.41 \times 10^0$$

$$P_{tm8} := P_{ped8} + \Delta P_{kl8} \quad P_{tm8} = 16.55 \times 10^3$$

$$Q_{tm8} := Q_{ped8} + \Delta Q_{kl8} \quad Q_{tm8} = 10.744 \times 10^3$$

$$S_{tm8} := \sqrt{P_{tm8}^2 + Q_{tm8}^2} \quad S_{tm8} = 19.731 \times 10^3$$

$$\cos \varphi_{tm8} := \frac{P_{tm8}}{S_{tm8}} \quad \sin \varphi_{tm8} := \frac{Q_{tm8}}{S_{tm8}} \quad \cos \varphi_{tm8} = 838.757 \times 10^{-3} \quad \sin \varphi_{tm8} = 544.505 \times 10^{-3}$$

$$\beta_{82} := \frac{S_{tm8}}{S_{nt28} \cdot 10^3} \quad \beta_{82} = 197.31 \times 10^{-3}$$

$$U_{tm8} := \sqrt{\left[ \sqrt{3} \cdot U_{ped8} + \frac{(P_{ped8} \cdot R_{kl8} + Q_{ped8} \cdot X_{kl8})}{\sqrt{3} \cdot U_{ped8}} \right]^2 + \left[ \frac{(P_{ped8} \cdot X_{kl8} - Q_{ped8} \cdot R_{kl8})}{\sqrt{3} \cdot U_{ped8}} \right]^2}$$

$$U_{tm8} = 735.296 \times 10^0$$

$$\Delta U_{kl8} := U_{tm8} - \sqrt{3} \cdot U_{ped8} \quad \Delta U_{kl8} = 28.45 \times 10^0$$

$$\Delta P_{t82} := 1000 \cdot (\Delta P_{xt28} + \beta_{82}^2 \cdot \Delta P_{kt28}) \quad \Delta P_{t82} = 403.435 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{t82} := 1000 \cdot (\Delta Q_{xt28} + \beta_{82}^2 \cdot \Delta Q_{kt28}) \quad \Delta Q_{t82} = 2.414 \times 10^3$$

$$\Delta S_{t82} := \sqrt{\Delta P_{t82}^2 + \Delta Q_{t82}^2} \quad \Delta S_{t82} = 2.448 \times 10^3$$

$$R_{t82} := \frac{\Delta P_{kt28} \cdot 10^3}{S_{nt28}^2} \cdot U_{nt28}^2 \quad R_{t82} = 38.4 \times 10^{-3}$$

$$X_{t82} := \frac{U_{nt28}^2}{S_{nt28}} \cdot \frac{10U_{kt28}}{1} \quad X_{t82} = 88 \times 10^{-3}$$

$$\Delta U_{t82} := \frac{kt_{28}^2 \cdot (R_{t82} \cdot P_{tm8} + X_{t82} \cdot Q_{tm8})}{U_{tm8}} \quad \Delta U_{t82} = 511.618 \times 10^{-3}$$

## 7 Скважина 5.2

$$U_{I7} := 380 \quad U_{n7} := \frac{U_{I7}}{\sqrt{3}} \quad U_{n7} = 219.393 \times 10^0 \quad \cos\phi_7 := 0.84$$

$$\eta_7 := 0.885 \quad P_{27} := 18500 \quad I_{n7} := \frac{P_{27}}{3 \cdot U_{n7} \cdot \eta_7 \cdot \cos\phi_7} \quad I_{n7} = 37.81 \times 10^0$$

$$X_{k7} := 1.799 \quad X_{m7} := 15.087 \quad R_{27} := 0.151 \quad s_{n7} := 0.026 \quad K_{du7} := 0.0035$$

$$U_{ad7} := \frac{U_{tm8-kt28} + \Delta U_{t82}}{\sqrt{3}} \quad U_{ad7} = 207.38 \times 10^0$$

$$\Delta U_7 := U_{ad7} - U_{n7} \quad \Delta U_7 = -12.013 \times 10^0$$

$$n_{nd7} := 750 \cdot (1 - s_{n7}) \quad n_{nd7} = 730.5 \times 10^0 \quad n_{07} := 750$$

$$\omega_{nd7} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{nd7}}{60} \quad \omega_{nd7} = 76.498 \times 10^0 \quad \omega_{07} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{07}}{60} \quad \omega_{07} = 78.54 \times 10^0$$

$$M_{n7} := \frac{P_{27}}{\omega_{nd7}} \quad M_{n7} = 241.837 \times 10^0 \quad M_{07} := 82$$

$$K_{m7} := 0.19$$

$$\omega_7 := \frac{M_{n7} \cdot \omega_{07} + M_{07} \cdot (\omega_{nd7} + K_{du7} \cdot \Delta U_7 - \omega_{07})}{M_{n7} + K_{m7} \cdot (\omega_{07} - \omega_{nd7} - K_{du7} \cdot \Delta U_7)} \quad \omega_7 = 77.706 \times 10^0$$

$$s_{7U} := \frac{\omega_{07} - \omega_7}{\omega_{07}} \quad s_{7U} = 10.617 \times 10^{-3}$$

$$P_{ad7} := \frac{K_{m7} \cdot \omega_7^2 + M_{07} \cdot \omega_7}{\eta_7} \quad P_{ad7} = 8.496 \times 10^3$$

$$I_{d7} := \frac{U_{ad7}}{\sqrt{X_{k7}^2 + \left(\frac{R_{27}}{s_{7U}}\right)^2}} \quad I_{d7} = 14.466 \times 10^0$$

$$Q_{ad7} := 3 \cdot \left( I_{d7}^2 \cdot X_{k7} + \frac{U_{ad7}^2}{X_{m7}} \right) \quad Q_{ad7} = 9.68115 \times 10^3$$

$$S_{ad7} := \sqrt{P_{ad7}^2 + Q_{ad7}^2} \quad S_{ad7} = 12.881 \times 10^3$$

## 6 Скважина 5.3

$$U_{16} := 400 \quad U_{n6} := \frac{U_{16}}{\sqrt{3}} \quad U_{n6} = 230.94 \times 10^0 \quad \cos\phi_6 := 0.81$$

$$\eta_6 := 0.924 \quad P_{26} := 45000 \quad I_{n6} := \frac{P_{26}}{3 \cdot U_{n6} \cdot \eta_6 \cdot \cos\phi_6} \quad I_{n6} = 86.783 \times 10^0$$

$$X_{k6} := 0.738 \quad X_{m6} := 6.349 \quad R_{26} := 0.062 \quad s_{n6} := 0.02 \quad K_{du6} := 0.0037$$

$$U_{ad6} := U_{ad7} \quad U_{ad6} = 207.38 \times 10^0$$

$$\Delta U_6 := U_{ad6} - U_{n6} \quad \Delta U_6 = -23.56 \times 10^0$$

$$n_{nd6} := 750 \cdot (1 - s_{n6}) \quad n_{nd6} = 735 \times 10^0 \quad n_{06} := 750$$

$$\omega_{nd6} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{nd6}}{60} \quad \omega_{nd6} = 76.969 \times 10^0 \quad \omega_{06} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{06}}{60}$$

$$M_{n6} := \frac{P_{26}}{\omega_{nd6}} \quad M_{n6} = 584.651 \times 10^0 \quad M_{06} := 228$$

$$K_{m6} := 0.282$$

$$\omega_6 := \frac{M_{n6} \cdot \omega_{06} + M_{06} \cdot (\omega_{nd6} + K_{du6} \cdot \Delta U_6 - \omega_{06})}{M_{n6} + K_{m6} \cdot (\omega_{06} - \omega_{nd6} - K_{du6} \cdot \Delta U_6)} \quad \omega_6 = 77.831 \times 10^0$$

$$s_{6U} := \frac{\omega_{06} - \omega_6}{\omega_{06}} \quad s_{6U} = 9.025 \times 10^{-3}$$

$$P_{ad6} := \frac{K_{m6} \cdot \omega_6^2 + M_{06} \cdot \omega_6}{\eta_6} \quad P_{ad6} = 21.054 \times 10^3$$

$$I_{d6} := \frac{U_{ad6}}{\sqrt{X_{k6}^2 + \left(\frac{R_{26}}{s_{6U}}\right)^2}} \quad I_{d6} = 30.014 \times 10^0$$

$$Q_{ad6} := 3 \cdot \left( I_{d6}^2 \cdot X_{k6} + \frac{U_{ad6}^2}{X_{m6}} \right) \quad Q_{ad6} = 2.23157 \times 10^4$$

$$S_{ad6} := \sqrt{P_{ad6}^2 + Q_{ad6}^2} \quad S_{ad6} = 30.68 \times 10^3$$

$$P_{tp678} := P_{tm8} + \Delta P_{t82} + P_{ad7} + P_{ad6} \quad P_{tp678} = 46.503 \times 10^3$$

$$Q_{tp678} := Q_{tm8} + \Delta Q_{t82} + Q_{ad7} + Q_{ad6} \quad Q_{tp678} = 45.155 \times 10^3$$

$$S_{tp678} := \sqrt{P_{tp678}^2 + Q_{tp678}^2} \quad S_{tp678} = 64.819 \times 10^3$$

$$\Delta P_{xt678} := 0.29$$

$$S_{nt678} := 100$$

$$\Delta P_{kt678} := 1.98$$

$$U_{kt678} := 4.5 \quad U_{nt678} := 0.4$$

$$I_{xt678} := 2.2 \quad k_{t678} := 15$$

$$\begin{aligned}
\Delta Q_{xt678} &:= S_{nt678} \cdot \frac{I_{xt678}}{100} & \Delta Q_{xt678} &= 2.2 \times 10^0 \\
\Delta Q_{kt678} &:= S_{nt678} \cdot \frac{U_{kt678}}{100} & \Delta Q_{kt678} &= 4.5 \times 10^0 \\
U_{tp678} &:= U_{tm8-kt28} + \Delta U_{t82} & U_{tp678} &= 359.193 \times 10^0 \\
\cos \varphi_{tp678} &:= \frac{P_{tp678}}{S_{tp678}} & \sin \varphi_{tp678} &:= \frac{Q_{tp678}}{S_{tp678}} \\
\cos \varphi_{tp678} &= 717.432 \times 10^{-3} & \sin \varphi_{tp678} &= 696.629 \times 10^{-3} \\
\beta_{678} &:= \frac{S_{tp678}}{S_{nt678} \cdot 10^3} & \beta_{678} &= 648.187 \times 10^{-3} \\
\Delta P_{t678} &:= 1000 \cdot (\Delta P_{xt678} + \beta_{678}^2 \cdot \Delta P_{kt678}) & \Delta P_{t678} &= 1.122 \times 10^3 \\
\Delta Q_{t678} &:= 1000 \cdot (\Delta Q_{xt678} + \beta_{678}^2 \cdot \Delta Q_{kt678}) & \Delta Q_{t678} &= 4.091 \times 10^3 \\
\Delta S_{t678} &:= \sqrt{\Delta P_{t678}^2 + \Delta Q_{t678}^2} & \Delta S_{t678} &= 4.242 \times 10^3 \\
R_{t678} &:= \frac{\Delta P_{kt678} \cdot 10^3}{S_{nt678}^2} \cdot U_{nt678}^2 & R_{t678} &= 31.68 \times 10^{-3} \\
X_{t678} &:= \frac{U_{nt678}^2}{S_{nt678}} \cdot \frac{10 U_{kt678}}{1} & X_{t678} &= 72 \times 10^{-3} \\
\Delta U_{t678} &:= \frac{R_{t678} \cdot P_{tp678} + X_{t678} \cdot Q_{tp678}}{U_{tp678}} & \Delta U_{t678} &= 13.153 \times 10^0 \\
U_{vtp678} &:= U_{tp678} \cdot kt_{678} + \Delta U_{t678} & U_{vtp678} &= 5.401 \times 10^3 \\
P_{vtp678} &:= P_{tp678} + \Delta P_{t678} & P_{vtp678} &= 47.625 \times 10^3 \\
Q_{vtp678} &:= Q_{tp678} + \Delta Q_{t678} & Q_{vtp678} &= 49.245 \times 10^3 \\
S_{vtp678} &:= \sqrt{P_{vtp678}^2 + Q_{vtp678}^2} & S_{vtp678} &= 68.507 \times 10^3 \\
R_{l678} &:= 0.046 & X_{l678} &:= 0.038 \\
\Delta P_{l678} &:= \frac{(P_{vtp678}^2 + Q_{vtp678}^2) \cdot R_{l678}}{U_{vtp678}^2} & \Delta P_{l678} &= 7.401 \times 10^0 \\
\Delta Q_{l678} &:= \frac{(P_{vtp678}^2 + Q_{vtp678}^2) \cdot X_{l678}}{U_{vtp678}^2} & \Delta Q_{l678} &= 6.114 \times 10^0
\end{aligned}$$

$$P5ad6ad7ped8 := Pvtp678 + \Delta P1678$$

$$P5ad6ad7ped8 = 47.632 \times 10^3$$

$$Q5ad6ad7ped8 := Qvtp678 + \Delta Q1678$$

$$Q5ad6ad7ped8 = 49.251 \times 10^3$$

$$U55 := \sqrt{\left[ Uvtp678 + \frac{(Pvtp678 \cdot R1678 + Qvtp678 \cdot X1678)}{Uvtp678} \right]^2 + \left[ \frac{(Pvtp678 \cdot X1678 - Qvtp678 \cdot R1678)}{Uvtp678} \right]^2}$$

$$\Delta U1678 := U55 - Uvtp678 \quad U55 = 5.4018 \times 10^3 \quad U5 = 5.4018 \times 10^3 \quad \Delta U1678 = 752.09 \times 10^{-3}$$

$$P5 := P5ped9 + P5ad6ad7ped8 \quad P5 = 101.66 \times 10^3$$

$$Q5 := Q5ped9 + Q5ad6ad7ped8 \quad Q5 = 92.868 \times 10^3$$

$$R135 := 0.069 \quad X135 := 0.057$$

$$\Delta P35 := \frac{(P5^2 + Q5^2) \cdot R135}{U5^2} \quad \Delta P35 = 44.833 \times 10^0$$

$$\Delta Q35 := \frac{(P5^2 + Q5^2) \cdot X135}{U5^2} \quad \Delta Q35 = 37.036 \times 10^0$$

$$P3ad6ad7ped8ped9 := P5 + \Delta P35 \quad P3ad6ad7ped8ped9 = 101.705 \times 10^3$$

$$Q3ad6ad7ped8ped9 := Q5 + \Delta Q35 \quad Q3ad6ad7ped8ped9 = 92.905 \times 10^3$$

$$U3 := \sqrt{\left[ U5 + \frac{(P5 \cdot R135 + Q5 \cdot X135)}{U5} \right]^2 + \left[ \frac{(P5 \cdot X135 - Q5 \cdot R135)}{U5} \right]^2} \quad U3 = 5.4041 \times 10^3$$

$$\Delta U35 := U3 - U5 \quad \Delta U35 = 2.279 \times 10^0$$

## 5 Скважина 3.1

$$U_{51} := 380 \quad U_{n51} := \frac{U_{51}}{\sqrt{3}} \quad U_{n51} = 219.393 \times 10^0 \quad \cos\phi_{51} := 0.84$$

$$\eta_{51} := 0.885 \quad P_{251} := 22000 \quad I_{n51} := \frac{P_{251}}{3 \cdot U_{n51} \cdot \eta_{51} \cdot \cos\phi_{51}} \quad I_{n51} = 44.963 \times 10^0$$

$$X_{k51} := 1.24 \quad X_{m51} := 10.109 \quad R_{251} := 0.174 \quad s_{n51} := 0.027 \quad K_{du51} := 0.0043$$

$$\Delta U_{51} := -12.235$$

$$U_{ad51} := U_{n51} + \Delta U_{51} \quad U_{ad51} = 207.158 \times 10^0$$

$$n_{nd51} := 750 \cdot (1 - s_{n51}) \quad n_{nd51} = 729.75 \times 10^0 \quad n_{051} := 750$$

$$\omega_{nd51} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{nd51}}{60} \quad \omega_{nd51} = 76.419 \times 10^0 \quad \omega_{051} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{051}}{60} \quad \omega_{051} = 78.54 \times 10^0$$

$$M_{n51} := \frac{P_{251}}{\omega_{nd51}} \quad M_{n51} = 287.886 \times 10^0 \quad M_{051} := 170$$

$$K_{m51} := 0.401$$

$$\omega_{51} := \frac{M_{n51} \cdot \omega_{051} + M_{051} \cdot (\omega_{nd51} + K_{du51} \cdot \Delta U_{51} - \omega_{051})}{M_{n51} + K_{m51} \cdot (\omega_{051} - \omega_{nd51} - K_{du51} \cdot \Delta U_{51})} \quad \omega_{51} = 77.023 \times 10^0$$

$$s_{51U} := \frac{\omega_{051} - \omega_{51}}{\omega_{051}} \quad s_{51U} = 19.308 \times 10^{-3}$$

$$P_{ad51} := \frac{K_{m51} \cdot \omega_{51}^2 + M_{051} \cdot \omega_{51}}{\eta_{51}} \quad P_{ad51} = 17.484 \times 10^3$$

$$I_{d51} := \frac{U_{ad51}}{\sqrt{X_{k51}^2 + \left(\frac{R_{251}}{s_{51U}}\right)^2}} \quad I_{d51} = 22.773 \times 10^0$$

$$Q_{ad51} := 3 \cdot \left( I_{d51}^2 \cdot X_{k51} + \frac{U_{ad51}^2}{X_{m51}} \right) \quad Q_{ad51} = 1.46647 \times 10^4$$

$$S_{ad51} := \sqrt{P_{ad51}^2 + Q_{ad51}^2} \quad S_{ad51} = 22.819 \times 10^3$$

## Скважина 3.2

$$\begin{aligned}
 U_{I52} &:= 380 & U_{n52} &:= \frac{U_{I52}}{\sqrt{3}} & U_{n52} &= 219.393 \times 10^0 & \cos\phi_{52} &:= 0.84 \\
 \eta_{52} &:= 0.885 & P_{252} &:= 22000 & I_{n52} &:= \frac{P_{252}}{3 \cdot U_{n52} \cdot \eta_{52} \cdot \cos\phi_{52}} & I_{n52} &= 44.963 \times 10^0 \\
 X_{k52} &:= 1.24 & X_{m52} &:= 10.109 & R_{252} &:= 0.174 & s_{n52} &:= 0.027 & K_{du52} &:= 0.0043
 \end{aligned}$$

$$\Delta U_{52} := \Delta U_{51}$$

$$U_{ad52} := U_{n52} + \Delta U_{52} \quad U_{ad52} = 207.158 \times 10^0$$

$$n_{nd52} := 750 \cdot (1 - s_{n52}) \quad n_{nd52} = 729.75 \times 10^0 \quad n_{052} := 750$$

$$\omega_{nd52} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{nd52}}{60} \quad \omega_{nd52} = 76.419 \times 10^0 \quad \omega_{052} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{052}}{60} \quad \omega_{052} = 78.54 \times 10^0$$

$$M_{n52} := \frac{P_{252}}{\omega_{nd52}} \quad M_{n52} = 287.886 \times 10^0$$

$$K_{m52} := 0.4 \quad M_{052} := 171$$

$$\omega_{52} := \frac{M_{n52} \cdot \omega_{052} + M_{052} \cdot (\omega_{nd52} + K_{du52} \cdot \Delta U_{52} - \omega_{052})}{M_{n52} + K_{m52} \cdot (\omega_{052} - \omega_{nd52} - K_{du52} \cdot \Delta U_{52})} \quad \omega_{52} = 77.016 \times 10^0$$

$$s_{52U} := \frac{\omega_{052} - \omega_{52}}{\omega_{052}} \quad s_{52U} = 19.396 \times 10^{-3}$$

$$P_{ad52} := \frac{K_{m52} \cdot \omega_{52}^2 + M_{052} \cdot \omega_{52}}{\eta_{52}} \quad P_{ad52} = 17.562 \times 10^3$$

$$I_{d52} := \frac{U_{ad52}}{\sqrt{X_{k52}^2 + \left(\frac{R_{252}}{s_{52U}}\right)^2}} \quad I_{d52} = 22.875 \times 10^0$$

$$Q_{ad52} := 3 \cdot \left( I_{d52}^2 \cdot X_{k52} + \frac{U_{ad52}^2}{X_{m52}} \right) \quad Q_{ad52} = 1.46821 \times 10^4$$

$$S_{ad52} := \sqrt{P_{ad52}^2 + Q_{ad52}^2} \quad S_{ad52} = 22.891 \times 10^3$$

## Скважина 3.3

$$\begin{aligned}
 U_{I53} &:= 380 & U_{n53} &:= \frac{U_{I53}}{\sqrt{3}} & U_{n53} &= 219.393 \times 10^0 & \cos\phi_{53} &:= 0.84 \\
 \eta_{53} &:= 0.885 & P_{253} &:= 22000 & I_{n53} &:= \frac{P_{253}}{3 \cdot U_{n53} \cdot \eta_{53} \cdot \cos\phi_{53}} & I_{n53} &= 44.963 \times 10^0
 \end{aligned}$$

$$Xk53 := 1.24 \quad Xm53 := 10.109 \quad R253 := 0.174 \quad sn53 := 0.027 \quad Kdu53 := 0.0043$$

$$\Delta U53 := \Delta U51$$

$$Uad53 := Un53 + \Delta U53$$

$$Uad53 = 207.158 \times 10^0$$

$$nnd53 := 750 \cdot (1 - sn53) \quad nnd53 = 729.75 \times 10^0 \quad n053 := 750$$

$$\omega nd53 := \frac{2 \cdot \pi \cdot nnd53}{60} \quad \omega nd53 = 76.419 \times 10^0 \quad \omega 053 := \frac{2 \cdot \pi \cdot n053}{60} \quad \omega 053 = 78.54 \times 10^0$$

$$Mn53 := \frac{P253}{\omega nd53} \quad Mn53 = 287.886 \times 10^0 \quad M053 := 171$$

$$Km53 := 0.4$$

$$\omega 53 := \frac{Mn53 \cdot \omega 053 + M053 \cdot (\omega nd53 + Kdu53 \cdot \Delta U53 - \omega 053)}{Mn53 + Km53 \cdot (\omega 053 - \omega nd53 - Kdu53 \cdot \Delta U53)} \quad \omega 53 = 77.016 \times 10^0$$

$$s53U := \frac{\omega 053 - \omega 53}{\omega 053} \quad s53U = 19.396 \times 10^{-3}$$

$$Pad53 := \frac{Km53 \cdot \omega 53^2 + M053 \cdot \omega 53}{\eta 53} \quad Pad53 = 17.562 \times 10^3$$

$$Id53 := \frac{Uad53}{\sqrt{Xk53^2 + \left(\frac{R253}{s53U}\right)^2}} \quad Id53 = 22.875 \times 10^0$$

$$Qad53 := 3 \cdot \left( Id53^2 \cdot Xk53 + \frac{Uad53^2}{Xm53} \right) \quad Qad53 = 1.46821 \times 10^4$$

$$Sad53 := \sqrt{Pad53^2 + Qad53^2} \quad Sad53 = 22.891 \times 10^3$$

$$Ptp5 := Pad51 + Pad52 + Pad53 \quad Ptp5 = 52.608 \times 10^3$$

$$Qtp5 := Qad51 + Qad52 + Qad53 \quad Qtp5 = 44.029 \times 10^3$$

$$Stp5 := \sqrt{Ptp5^2 + Qtp5^2} \quad Stp5 = 68.601 \times 10^3$$

$$\Delta P_{xt5} := 0.22 \quad S_{nt5} := 63 \quad U_{nt5} := 0.4$$

$$\Delta P_{kt5} := 1.28 \quad k_{t5} := 15$$

$$U_{kt5} := 4.5 \quad I_{xt5} := 2.4$$

$$\Delta Q_{xt5} := S_{nt5} \cdot \frac{I_{xt5}}{100} \quad \Delta Q_{xt5} = 1.512 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{kt5} := S_{nt5} \cdot \frac{U_{kt5}}{100} \quad \Delta Q_{kt5} = 2.835 \times 10^0$$

$$U_{tp5} := \sqrt{3} \cdot U_{ad51} \quad U_{tp5} = 358.808 \times 10^0$$

$$\cos \varphi_{tp5} := \frac{P_{tp5}}{S_{tp5}} \quad \sin \varphi_{tp5} := \frac{Q_{tp5}}{S_{tp5}} \quad \cos \varphi_{tp5} = 766.863 \times 10^{-3} \quad \sin \varphi_{tp5} = 641.811 \times 10^{-3}$$

$$\beta_5 := \frac{S_{tp5}}{S_{nt5} \cdot 10^3} \quad \beta_5 = 1.089 \times 10^0$$

$$\Delta P_{t5} := 1000 \cdot (\Delta P_{xt5} + \beta_5^2 \cdot \Delta P_{kt5}) \quad \Delta P_{t5} = 1.738 \times 10^3$$

$$\Delta Q_{t5} := 1000 \cdot (\Delta Q_{xt5} + \beta_5^2 \cdot \Delta Q_{kt5}) \quad \Delta Q_{t5} = 4.874 \times 10^3$$

$$\Delta S_{t5} := \sqrt{\Delta P_{t5}^2 + \Delta Q_{t5}^2} \quad \Delta S_{t5} = 5.174 \times 10^3$$

$$R_{t5} := \frac{\Delta P_{kt5} \cdot 10^3}{S_{nt5}^2} \cdot U_{nt5}^2 \quad R_{t5} = 51.6 \times 10^{-3}$$

$$X_{t5} := \frac{U_{nt5}^2}{S_{nt5}} \cdot \frac{10 U_{kt5}}{1} \quad X_{t5} = 114.286 \times 10^{-3}$$

$$\Delta U_{t5} := \frac{R_{t5} \cdot P_{tp5} + X_{t5} \cdot Q_{tp5}}{U_{tp5}} \quad \Delta U_{t5} = 21.589 \times 10^0$$

$$U_{vtp5} := U_{tp5} \cdot k_{t5} + \Delta U_{t5} \quad U_{vtp5} = 5.404 \times 10^3$$

$$P_{vtp5} := P_{tp5} + \Delta P_{t5} \quad P_{vtp5} = 54.345 \times 10^3$$

$$Q_{vtp5} := Q_{tp5} + \Delta Q_{t5} \quad Q_{vtp5} = 48.902 \times 10^3$$

$$S_{vtp5} := \sqrt{P_{vtp5}^2 + Q_{vtp5}^2} \quad S_{vtp5} = 73.109 \times 10^3$$

$$R_{l5} := 0.023 \quad X_{l5} := 0.019$$

$$\Delta P_{l5} := \frac{(P_{vtp5}^2 + Q_{vtp5}^2) \cdot R_{l5}}{U_{vtp5}^2} \quad \Delta Q_{l5} := \frac{(P_{vtp5}^2 + Q_{vtp5}^2) \cdot X_{l5}}{U_{vtp5}^2}$$

$$P_{3ad51ad52ad53} := P_{vtp5} + \Delta P_{l5} \quad Q_{3ad51ad52ad53} := Q_{vtp5} + \Delta Q_{l5}$$

$$\Delta P_{15} = 4.21 \times 10^0 \quad \Delta Q_{15} = 3.478 \times 10^0$$

$$P_{3ad51ad52ad53} = 54.35 \times 10^3 \quad Q_{3ad51ad52ad53} = 48.906 \times 10^3$$

$$U_{33} := \sqrt{\left[ U_{vtp5} + \frac{(P_{vtp5} \cdot R_{15} + Q_{vtp5} \cdot X_{15})}{U_{vtp5}} \right]^2 + \left[ \frac{(P_{vtp5} \cdot X_{15} - Q_{vtp5} \cdot R_{15})}{U_{vtp5}} \right]^2}$$

$$U_{33} = 5.4041 \times 10^3 \quad U_3 = 5.4041 \times 10^3$$

$$\Delta U_{15} := U_{33} - U_{vtp5} \quad \Delta U_{15} = 403.258 \times 10^{-3}$$

4

Скважина 4

$$U_{14} := 400 \quad U_{n4} := \frac{U_{14}}{\sqrt{3}} \quad U_{n4} = 230.94 \times 10^0 \quad \cos \phi_4 := 0.81 \quad \sin \phi_4 := 0.02$$

$$\eta_4 := 0.92 \quad P_{24} := 37000 \quad I_{n4} := \frac{P_{24}}{3 \cdot U_{n4} \cdot \eta_4 \cdot \cos \phi_4} \quad I_{n4} = 71.665 \times 10^0$$

$$X_{k4} := 0.887 \quad X_{m4} := 7.646 \quad R_{24} := 0.075$$

$$\Delta U_4 := -23.127 \quad K_{du4} := 0.0039$$

$$U_{ad4} := U_{n4} + \Delta U_4 \quad U_{ad4} = 207.813 \times 10^0$$

$$n_{nd4} := 750 \cdot (1 - \sin \phi_4) \quad n_{nd4} = 735 \times 10^0 \quad n_{04} := 750$$

$$\omega_{nd4} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{nd4}}{60} \quad \omega_{nd4} = 76.969 \times 10^0 \quad \omega_{04} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{04}}{60} \quad \omega_{04} = 78.54 \times 10^0$$

$$M_{n4} := \frac{P_{24}}{\omega_{nd4}} \quad M_{n4} = 480.713 \times 10^0 \quad M_{04} := 35$$

$$K_{m4} := 0.06$$

$$\omega_4 := \frac{M_{n4} \cdot \omega_{04} + M_{04} \cdot (\omega_{nd4} + K_{du4} \cdot \Delta U_4 - \omega_{04})}{M_{n4} + K_{m4} \cdot (\omega_{04} - \omega_{nd4} - K_{du4} \cdot \Delta U_4)} \quad \omega_4 = 78.403 \times 10^0$$

$$s_{4U} := \frac{\omega_{04} - \omega_4}{\omega_{04}} \quad s_{4U} = 1.747 \times 10^{-3}$$

$$P_{ad4} := \frac{K_{m4} \cdot \omega_4^2 + M_{04} \cdot \omega_4}{\eta_4} \quad P_{ad4} = 3.384 \times 10^3$$

$$I_{d4} := \frac{U_{ad4}}{\sqrt{X_{k4}^2 + \left( \frac{R_{24}}{s_{4U}} \right)^2}} \quad I_{d4} = 4.839 \times 10^0$$

$$Q_{ad4} := 3 \cdot \left( I_{d4}^2 \cdot X_{k4} + \frac{U_{ad4}^2}{X_{m4}} \right) \quad Q_{ad4} = 1.7007 \times 10^4$$

$$S_{ad4} := \sqrt{P_{ad4}^2 + Q_{ad4}^2} \quad S_{ad4} = 17.34 \times 10^3$$

$$P_{tp4} := P_{ad4} \quad P_{tp4} = 3.384 \times 10^3$$

$$Q_{tp4} := Q_{ad4} \quad Q_{tp4} = 17.007 \times 10^3$$

$$S_{tp4} := \sqrt{P_{tp4}^2 + Q_{tp4}^2} \quad S_{tp4} = 17.34 \times 10^3$$

$$\Delta P_{xt4} := 0.29 \quad S_{nt4} := 100$$

$$\Delta P_{kt4} := 1.98$$

$$U_{kt4} := 4.5 \quad U_{nt4} := 0.4$$

$$I_{xt4} := 2.2 \quad k_{t4} := 15$$

$$\Delta Q_{xt4} := S_{nt4} \cdot \frac{I_{xt4}}{100} \quad \Delta Q_{xt4} = 2.2 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{kt4} := S_{nt4} \cdot \frac{U_{kt4}}{100} \quad \Delta Q_{kt4} = 4.5 \times 10^0$$

$$U_{tp4} := \sqrt{3} \cdot U_{ad4} \quad U_{tp4} = 359.943 \times 10^0$$

$$\cos \varphi_{tp4} := \frac{P_{tp4}}{S_{tp4}} \quad \sin \varphi_{tp4} := \frac{Q_{tp4}}{S_{tp4}} \quad \cos \varphi_{tp4} = 195.129 \times 10^{-3} \quad \sin \varphi_{tp4} = 980.778 \times 10^{-3}$$

$$\beta_4 := \frac{S_{tp4}}{S_{nt4} \cdot 10^3} \quad \beta_4 = 173.403 \times 10^{-3}$$

$$\Delta P_{t4} := 1000 \cdot (\Delta P_{xt4} + \beta_4^2 \cdot \Delta P_{kt4}) \quad \Delta P_{t4} = 349.536 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{t4} := 1000 \cdot (\Delta Q_{xt4} + \beta_4^2 \cdot \Delta Q_{kt4}) \quad \Delta Q_{t4} = 2.335 \times 10^3$$

$$\Delta S_{t4} := \sqrt{\Delta P_{t4}^2 + \Delta Q_{t4}^2} \quad \Delta S_{t4} = 2.361 \times 10^3$$

$$R_{t4} := \frac{\Delta P_{kt4} \cdot 10^3}{S_{nt4}^2} \cdot U_{nt4}^2 \quad R_{t4} = 31.68 \times 10^{-3}$$

$$X_{t4} := \frac{U_{nt4}^2}{S_{nt4}} \cdot \frac{10 U_{kt4}}{1} \quad X_{t4} = 72 \times 10^{-3}$$

$$\Delta U_{t4} := \frac{R_{t4} \cdot P_{tp4} + X_{t4} \cdot Q_{tp4}}{U_{tp4}} \quad \Delta U_{t4} = 3.7 \times 10^0$$

$$U_{vtp4} := U_{tp4} \cdot kt4 + \Delta U_{t4} \quad U_{vtp4} = 5.403 \times 10^3$$

$$P_{vtp4} := P_{tp4} + \Delta P_{t4} \quad P_{vtp4} = 3.733 \times 10^3$$

$$Q_{vtp4} := Q_{tp4} + \Delta Q_{t4} \quad Q_{vtp4} = 19.342 \times 10^3$$

$$S_{vtp4} := \sqrt{P_{vtp4}^2 + Q_{vtp4}^2} \quad S_{vtp4} = 19.699 \times 10^3$$

$$R_{I34} := 0.345 \quad X_{I34} := 0.287$$

$$\Delta P_{34} := \frac{(P_{vtp4}^2 + Q_{vtp4}^2) \cdot R_{I34}}{U_{vtp4}^2} \quad \Delta P_{34} = 4.586 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{34} := \frac{(P_{vtp4}^2 + Q_{vtp4}^2) \cdot X_{I34}}{U_{vtp4}^2} \quad \Delta Q_{34} = 3.815 \times 10^0$$

$$P_{3ad4} := P_{vtp4} + \Delta P_{34} \quad P_{3ad4} = 3.738 \times 10^3$$

$$Q_{3ad4} := Q_{vtp4} + \Delta Q_{34} \quad Q_{3ad4} = 19.346 \times 10^3$$

$$U_{333} := \sqrt{\left[ U_{vtp4} + \frac{(P_{vtp4} \cdot R_{I34} + Q_{vtp4} \cdot X_{I34})}{U_{vtp4}} \right]^2 + \left[ \frac{(P_{vtp4} \cdot X_{I34} - Q_{vtp4} \cdot R_{I34})}{U_{vtp4}} \right]^2}$$

$$U_{333} = 5.4041 \times 10^3 \quad U_3 = 5.4041 \times 10^3$$

$$\Delta U_{34} := U_{333} - U_{vtp4} \quad \Delta U_{34} = 1.266 \times 10^0$$

$$R_{I23} := 0.322 \quad X_{I23} := 0.267$$

$$P_3 := P_{3ad4} + P_{3ad51ad52ad53} + P_{3ad6ad7ped8ped9} \quad P_3 = 159.792 \times 10^3$$

$$Q_3 := Q_{3ad4} + Q_{3ad51ad52ad53} + Q_{3ad6ad7ped8ped9} \quad Q_3 = 161.157 \times 10^3$$

$$\Delta P_{23} := \frac{(P_3^2 + Q_3^2) \cdot R_{I23}}{U_3^2} \quad \Delta P_{23} = 567.894 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{23} := \frac{(P_3^2 + Q_3^2) \cdot X_{I23}}{U_3^2} \quad \Delta Q_{23} = 470.893 \times 10^0$$

$$P_{2ad4567ped89} := P_3 + \Delta P_{23} \quad P_{2ad4567ped89} = 160.36 \times 10^3$$

$$Q_{2ad4567ped89} := Q_3 + \Delta Q_{23} \quad Q_{2ad4567ped89} = 161.628 \times 10^3$$

$$U_2 := \sqrt{\left[ U_3 + \frac{(P_3 \cdot R_{I23} + Q_3 \cdot X_{I23})}{U_3} \right]^2 + \left[ \frac{(P_3 \cdot X_{I23} - Q_3 \cdot R_{I23})}{U_3} \right]^2} \quad U_2 = 5.4215 \times 10^3$$

$$\Delta U_{23} := U_2 - U_3 \quad \Delta U_{23} = 17.484 \times 10^0$$

## 3 Скважина 2.1

$$U_{l3} := 1400 \quad U_{n3} := \frac{U_{l3}}{\sqrt{3}} \quad U_{n3} = 808.29 \times 10^0 \quad \cos\phi_3 := 0.83 \quad \sin_3 := 0.055$$

$$\eta_3 := 0.81 \quad P_{23} := 45000 \quad I_{n3} := \frac{P_{23}}{3 \cdot U_{n3} \cdot \eta_3 \cdot \cos\phi_3} \quad n_{nd3} := 2835$$

$$\omega_{nd3} := \frac{\pi \cdot n_{nd3}}{30} \quad \omega_{nd3} = 296.881 \times 10^0$$

$$X_{k3} := 6.884 \quad X_{m3} := 68.414$$

$$R_{23} := 1.868 \quad K_{du3} := 0.0561 \quad n_{03} := 3000 \quad \omega_{03} := \frac{\pi \cdot n_{03}}{30} \quad \omega_{03} = 314.159 \times 10^0$$

$$\Delta U_3 := -73.28$$

$$U_{ped3} := U_{n3} + \Delta U_3 \quad U_{ped3} = 735.01 \times 10^0$$

$$K_{m3} := 1.303 \times 10^{-3} \quad M_{03} := 9.81 \cdot 0.45 = 4.415 \times 10^0$$

$$M_{n3} := \frac{P_{23}}{\omega_{nd3}} \quad M_{n3} = 151.576 \times 10^0$$

$$\omega_3 := \frac{\sqrt{M_{n3}^2 + 4 \cdot K_{m3} \cdot (\omega_{03} - \omega_{nd3} - K_{du3} \cdot \Delta U_3) \cdot [M_{n3} \cdot \omega_{03} + K_{du3} \cdot \Delta U_3 \cdot M_{03} - (\omega_{03} - \omega_{nd3}) \cdot M_{03}] - M_{n3}}}{2 \cdot K_{m3} \cdot (\omega_{03} - \omega_{nd3} - K_{du3} \cdot \Delta U_3)}$$

$$\omega_3 = 297.286 \times 10^0$$

$$s_{3U} := \frac{\omega_{03} - \omega_3}{\omega_{03}} \quad s_{3U} = 53.71 \times 10^{-3}$$

$$P_{ped3} := \frac{K_{m3} \cdot \omega_3^3 + M_{03} \cdot \omega_3}{\eta_3} \quad P_{ped3} = 43.885 \times 10^3$$

$$I_{d3} := \frac{U_{ped3}}{\sqrt{X_{k3}^2 + \left(\frac{R_{23}}{s_{3U}}\right)^2}} \quad I_{d3} = 20.731 \times 10^0$$

$$Q_{ped3} := 3 \cdot \left( I_{d3}^2 \cdot X_{k3} + \frac{U_{ped3}^2}{X_{m3}} \right) \quad Q_{ped3} = 3.25659 \times 10^4$$

$$S_{ped3} := \sqrt{P_{ped3}^2 + Q_{ped3}^2} \quad S_{ped3} = 54.648 \times 10^3$$

$$R_{kd3} := 1.098 \quad X_{kd3} := 0.14$$

$$\Delta P_{xt23} := 0.31 \quad S_{nt23} := 100 \quad U_{nt23} := 0.4$$

$$\Delta P_{kt23} := 2.4$$

$$U_{kt23} := 5.5$$

$$k_{t23} := \frac{1}{3.65}$$

$$I_{xt23} := 2.2$$

$$\Delta Q_{xt23} := S_{nt23} \cdot \frac{I_{xt23}}{100} \quad \Delta Q_{xt23} = 2.2 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{kt23} := S_{nt23} \cdot \frac{U_{kt23}}{100} \quad \Delta Q_{kt23} = 5.5 \times 10^0$$

$$\Delta P_{k3} := \frac{(P_{ped3}^2 + Q_{ped3}^2) \cdot R_{k3}}{3U_{ped3}^2} \quad \Delta P_{k3} = 2.023 \times 10^3$$

$$\Delta Q_{k3} := \frac{(P_{ped3}^2 + Q_{ped3}^2) \cdot X_{k3}}{3U_{ped3}^2} \quad \Delta Q_{k3} = 257.974 \times 10^0$$

$$P_{tm3} := P_{ped3} + \Delta P_{k3} \quad P_{tm3} = 45.909 \times 10^3$$

$$Q_{tm3} := Q_{ped3} + \Delta Q_{k3} \quad Q_{tm3} = 32.824 \times 10^3$$

$$S_{tm3} := \sqrt{P_{tm3}^2 + Q_{tm3}^2} \quad S_{tm3} = 56.436 \times 10^3$$

$$\cos \varphi_{tm3} := \frac{P_{tm3}}{S_{tm3}} \quad \sin \varphi_{tm3} := \frac{Q_{tm3}}{S_{tm3}} \quad \cos \varphi_{tm3} = 813.465 \times 10^{-3} \quad \sin \varphi_{tm3} = 581.614 \times 10^{-3}$$

$$\beta_{32} := \frac{S_{tm3}}{S_{nt23} \cdot 10^3} \quad \beta_{32} = 564.358 \times 10^{-3}$$

$$U_{tm3} := \sqrt{\left[ \sqrt{3} \cdot U_{ped3} + \frac{(P_{ped3} \cdot R_{k3} + Q_{ped3} \cdot X_{k3})}{\sqrt{3} \cdot U_{ped3}} \right]^2 + \left[ \frac{(P_{ped3} \cdot X_{k3} - Q_{ped3} \cdot R_{k3})}{\sqrt{3} \cdot U_{ped3}} \right]^2}$$

$$U_{tm3} = 1.315 \times 10^3$$

$$\Delta U_{k3} := U_{tm3} - \sqrt{3} \cdot U_{ped3} \quad \Delta U_{k3} = 41.637 \times 10^0$$

$$\Delta P_{t32} := 1000 \cdot (\Delta P_{xt23} + \beta_{32}^2 \cdot \Delta P_{kt23}) \quad \Delta P_{t32} = 1.074 \times 10^3$$

$$\Delta Q_{t32} := 1000 \cdot (\Delta Q_{xt23} + \beta_{32}^2 \cdot \Delta Q_{kt23}) \quad \Delta Q_{t32} = 3.952 \times 10^3$$

$$\Delta S_{t32} := \sqrt{\Delta P_{t32}^2 + \Delta Q_{t32}^2} \quad \Delta S_{t32} = 4.095 \times 10^3$$

$$P_{tp3} := P_{tm3} + \Delta P_{t32} \quad P_{tp3} = 46.983 \times 10^3$$

$$Q_{tp3} := Q_{tm3} + \Delta Q_{t32} \quad Q_{tp3} = 36.776 \times 10^3$$

$$S_{tp3} := \sqrt{P_{tp3}^2 + Q_{tp3}^2} \quad S_{tp3} = 59.664 \times 10^3$$

$$R_{t32} := \frac{\Delta P_{kt23} \cdot 10^3}{S_{nt23}^2} \cdot U_{nt23}^2 \quad R_{t32} = 38.4 \times 10^{-3}$$

$$X_{t32} := \frac{U_{nt23}^2}{S_{nt23}} \cdot \frac{10U_{kt23}}{1} \quad X_{t32} = 88 \times 10^{-3}$$

$$\Delta U_{t32} := \frac{kt23^2 \cdot (R_{t32} \cdot P_{tm3} + X_{t32} \cdot Q_{tm3})}{U_{tm3}} \quad \Delta U_{t32} = 265.562 \times 10^{-3}$$

2 Скважина 2.2

$$U_{l2} := 380$$

$$U_{n2} := \frac{U_{l2}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{n2} = 219.393 \times 10^0 \quad \cos\phi_2 := 0.84$$

$$\eta_2 := 0.885$$

$$P_{22} := 18500$$

$$I_{n2} := \frac{P_{22}}{3 \cdot U_{n2} \cdot \eta_2 \cdot \cos\phi_2}$$

$$I_{n2} = 37.81 \times 10^0$$

$$X_{k2} := 1.799$$

$$X_{m2} := 15.087$$

$$R_{22} := 0.151$$

$$s_{n2} := 0.026$$

$$K_{du2} := 0.0035$$

$$U_{ad2} := \frac{U_{tm3} \cdot kt23 + \Delta U_{t32}}{\sqrt{3}} \quad U_{ad2} = 208.112 \times 10^0$$

$$\Delta U_2 := U_{ad2} - U_{n2} \quad \Delta U_2 = -11.281 \times 10^0$$

$$n_{nd2} := 750 \cdot (1 - s_{n2}) \quad n_{nd2} = 730.5 \times 10^0 \quad n_{02} := 750$$

$$\omega_{nd2} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{nd2}}{60} \quad \omega_{nd2} = 76.498 \times 10^0 \quad \omega_{02} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{02}}{60} \quad \omega_{02} = 78.54 \times 10^0$$

$$M_{n2} := \frac{P_{22}}{\omega_{nd2}} \quad M_{n2} = 241.837 \times 10^0 \quad M_{02} := 54.5$$

$$K_{m2} := 0.126$$

$$\omega_2 := \frac{M_{n2} \cdot \omega_{02} + M_{02} \cdot (\omega_{nd2} + K_{du2} \cdot \Delta U_2 - \omega_{02})}{M_{n2} + K_{m2} \cdot (\omega_{02} - \omega_{nd2} - K_{du2} \cdot \Delta U_2)} \quad \omega_2 = 77.986 \times 10^0$$

$$s_{2U} := \frac{\omega_{02} - \omega_2}{\omega_{02}} \quad s_{2U} = 7.049 \times 10^{-3}$$

$$P_{ad2} := \frac{K_{m2} \cdot \omega_2^2 + M_{02} \cdot \omega_2}{\eta_2} \quad P_{ad2} = 5.668 \times 10^3$$

$$I_{d2} := \frac{U_{ad2}}{\sqrt{X_{k2}^2 + \left(\frac{R_{22}}{s_{2U}}\right)^2}} \quad I_{d2} = 9.682 \times 10^0$$

$$Q_{ad2} := 3 \cdot \left( I_{d2}^2 \cdot X_{k2} + \frac{U_{ad2}^2}{X_{m2}} \right) \quad Q_{ad2} = 9.11807 \times 10^3$$

$$S_{ad2} := \sqrt{P_{ad2}^2 + Q_{ad2}^2} \quad S_{ad7} = 12.881 \times 10^3$$

$$P_{tp23} := P_{tm3} + \Delta P_{t32} + P_{ad2} \quad P_{tp23} = 52.651 \times 10^3$$

$$Q_{tp23} := Q_{tm3} + \Delta Q_{t32} + Q_{ad2} \quad Q_{tp23} = 45.894 \times 10^3$$

$$S_{tp23} := \sqrt{P_{tp23}^2 + Q_{tp23}^2} \quad S_{tp23} = 69.846 \times 10^3$$

$$\Delta P_{xt13} := 0.29 \quad S_{ntp13} := 100$$

$$\Delta P_{kt13} := 1.98$$

$$U_{kt13} := 4.5$$

$$I_{xt13} := 2.2$$

$$U_{ntp13} := 0.4$$

$$k_{tp13} := 15$$

$$\Delta Q_{xtp23} := S_{ntp13} \cdot \frac{I_{xt23}}{100} \quad \Delta Q_{xtp23} = 2.2 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{ktp23} := S_{ntp13} \cdot \frac{U_{kt13}}{100} \quad \Delta Q_{ktp23} = 4.5 \times 10^0$$

$$U_{tp23} := U_{tm3} \cdot k_{tp23} + \Delta U_{t32} \quad U_{tp23} = 360.461 \times 10^0$$

$$\cos \varphi_{tp23} := \frac{P_{tp23}}{S_{tp23}} \quad \sin \varphi_{tp23} := \frac{Q_{tp23}}{S_{tp23}} \quad \cos \varphi_{tp23} = 753.826 \times 10^{-3} \quad \sin \varphi_{tp23} = 657.074 \times 10^{-3}$$

$$\beta_{13} := \frac{S_{tp23}}{S_{nt23} \cdot 10^3} \quad \beta_{13} = 698.455 \times 10^{-3}$$

$$\Delta P_{tp23} := 1000 \cdot (\Delta P_{xt13} + \beta_{13}^2 \cdot \Delta P_{kt13}) \quad \Delta P_{tp23} = 1.256 \times 10^3$$

$$\Delta Q_{tp23} := 1000 \cdot (\Delta Q_{xtp23} + \beta_{13}^2 \cdot \Delta Q_{ktp23}) \quad \Delta Q_{tp23} = 4.395 \times 10^3$$

$$\Delta S_{tp23} := \sqrt{\Delta P_{tp23}^2 + \Delta Q_{tp23}^2} \quad \Delta S_{tp23} = 4.571 \times 10^3$$

$$R_{tp23} := \frac{\Delta P_{kt13} \cdot 10^3}{S_{ntp13}^2} \cdot U_{ntp13}^2 \quad R_{tp23} = 31.68 \times 10^{-3}$$

$$X_{tp23} := \frac{U_{ntp13}^2}{S_{ntp13}} \cdot \frac{10 U_{kt13}}{1} \quad X_{tp23} = 72 \times 10^{-3}$$

$$\Delta U_{tp23} := \frac{R_{tp23} \cdot P_{tp23} + X_{tp23} \cdot Q_{tp23}}{U_{tp23}} \quad \Delta U_{tp23} = 13.794 \times 10^0$$

$$U_{vtp23} := U_{tp23} \cdot k_{tp13} + \Delta U_{tp23}$$

$$U_{vtp23} = 5.421 \times 10^3$$

$$P_{vtp23} := P_{tp23} + \Delta P_{tp23}$$

$$P_{vtp23} = 53.907 \times 10^3$$

$$Q_{vtp23} := Q_{tp23} + \Delta Q_{tp23}$$

$$Q_{vtp23} = 50.289 \times 10^3$$

$$S_{vtp23} := \sqrt{P_{vtp23}^2 + Q_{vtp23}^2}$$

$$S_{vtp23} = 73.722 \times 10^3$$

$$R_{l2} := 0.046 \quad X_{l2} := 0.032$$

$$\Delta P_{l2} := \frac{(P_{vtp23}^2 + Q_{vtp23}^2) \cdot R_{l2}}{U_{vtp23}^2} \quad \Delta P_{l2} = 8.508 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{l2} := \frac{(P_{vtp23}^2 + Q_{vtp23}^2) \cdot X_{l2}}{U_{vtp23}^2} \quad \Delta Q_{l2} = 5.919 \times 10^0$$

$$P_{2ad2ped3} := P_{vtp23} + \Delta P_{l2} \quad P_{2ad2ped3} = 53.916 \times 10^3$$

$$Q_{2ad2ped3} := Q_{vtp23} + \Delta Q_{l2} \quad Q_{2ad2ped3} = 50.295 \times 10^3$$

$$U_{22} := \sqrt{\left[ U_{vtp23} + \frac{(P_{vtp23} \cdot R_{l2} + Q_{vtp23} \cdot X_{l2})}{U_{vtp23}} \right]^2 + \left[ \frac{(P_{vtp23} \cdot X_{l2} - Q_{vtp23} \cdot R_{l2})}{U_{vtp23}} \right]^2}$$

$$U_{22} = 5.4215 \times 10^3 \quad U_2 = 5.4215 \times 10^3$$

$$\Delta U_{l2} := U_{22} - U_{vtp23} \quad \Delta U_{l2} = 3.459 \times 10^0$$

$$P_2 := P_{2ad2ped3} + P_{2ad4567ped89} \quad P_2 = 214.276 \times 10^3$$

$$Q_2 := Q_{2ad2ped3} + Q_{2ad4567ped89} \quad Q_2 = 211.923 \times 10^3$$

$$R_{l12} := 0.138 \quad X_{l12} := 0.115$$

$$\Delta P_{l12} := \frac{(P_2^2 + Q_2^2) \cdot R_{l12}}{U_2^2} \quad \Delta P_{l12} = 426.424 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{l12} := \frac{(P_2^2 + Q_2^2) \cdot X_{l12}}{U_2^2} \quad \Delta Q_{l12} = 355.353 \times 10^0$$

$$P_{1ad2ped3ad4567ped89} := P_2 + \Delta P_{l12} \quad P_{1ad2ped3ad4567ped89} = 214.702 \times 10^3$$

$$Q_{1ad2ped3ad4567ped89} := Q_2 + \Delta Q_{l12} \quad Q_{1ad2ped3ad4567ped89} = 212.278 \times 10^3$$

$$U1 := \sqrt{\left[ U2 + \frac{(P2 \cdot R112 + Q2 \cdot X112)}{U2} \right]^2 + \left[ \frac{(P2 \cdot X112 - Q2 \cdot R112)}{U2} \right]^2} \quad U1 = 5.4315 \times 10^3$$

$$\Delta U12 := U1 - U2 \quad \Delta U12 = 9.949 \times 10^0$$

1 Скважина 800

$$U11 := 380 \quad Un1 := \frac{U11}{\sqrt{3}} \quad Un1 = 219.393 \times 10^0 \quad \cos\phi1 := 0.75 \quad sn1 := 0.025$$

$$\eta1 := 0.87 \quad P21 := 11000 \quad In1 := \frac{P21}{3 \cdot Un1 \cdot \eta1 \cdot \cos\phi1} \quad In1 = 25.613 \times 10^0$$

$$Xk1 := 2.655 \quad Xm1 := 17.131 \quad R21 := 0.266 \quad Kdu1 := 0.004$$

$$\Delta U1 := -10.45$$

$$Uad1 := Un1 + \Delta U1 \quad Uad1 = 208.943 \times 10^0$$

$$nnd1 := 750 \cdot (1 - sn1) \quad nnd1 = 731.25 \times 10^0 \quad n01 := 750$$

$$\omega nd1 := \frac{2 \cdot \pi \cdot nnd1}{60} \quad \omega nd1 = 76.576 \times 10^0 \quad \omega 01 := \frac{2 \cdot \pi \cdot n01}{60} \quad \omega 01 = 78.54 \times 10^0$$

$$Mn1 := \frac{P21}{\omega nd1} \quad Mn1 = 143.648 \times 10^0 \quad M01 := 28$$

$$Km1 := 0.098$$

$$\omega 1 := \frac{Mn1 \cdot \omega 01 + M01 \cdot (\omega nd1 + Kdu1 \cdot \Delta U1 - \omega 01)}{Mn1 + Km1 \cdot (\omega 01 - \omega nd1 - Kdu1 \cdot \Delta U1)} \quad \omega 1 = 78.042 \times 10^0$$

$$s1U := \frac{\omega 01 - \omega 1}{\omega 01} \quad s1U = 6.336 \times 10^{-3}$$

$$Pad1 := \frac{Km1 \cdot \omega 1^2 + M01 \cdot \omega 1}{\eta 2} \quad Pad1 = 3.144 \times 10^3$$

$$Id1 := \frac{Uad1}{\sqrt{Xk1^2 + \left( \frac{R21}{s1U} \right)^2}} \quad Id1 = 4.967 \times 10^0$$

$$Q_{ad1} := 3 \cdot \left( I_{d1}^2 \cdot X_{k1} + \frac{U_{ad1}^2}{X_{m1}} \right) \quad Q_{ad1} = 7.84182 \times 10^3$$

$$S_{ad1} := \sqrt{P_{ad1}^2 + Q_{ad1}^2} \quad S_{ad1} = 8.448 \times 10^3$$

$$P_{tp1} := P_{ad1} \quad P_{tp1} = 3.144 \times 10^3$$

$$Q_{tp1} := Q_{ad1} \quad Q_{tp1} = 7.842 \times 10^3$$

$$S_{tp1} := \sqrt{P_{tp1}^2 + Q_{tp1}^2} \quad S_{tp1} = 8.448 \times 10^3$$

$$\Delta P_{xt1} := 0.22$$

$$S_{nt1} := 63$$

$$U_{nt1} := 0.4$$

$$\Delta P_{kt1} := 1.28$$

$$U_{kt1} := 4.5$$

$$I_{xt1} := 2.4$$

$$k_{t1} := 15$$

$$\Delta Q_{xt1} := S_{nt1} \cdot \frac{I_{xt1}}{100} \quad \Delta Q_{xt1} = 1.512 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{kt1} := S_{nt1} \cdot \frac{U_{kt1}}{100} \quad \Delta Q_{kt1} = 2.835 \times 10^0$$

$$U_{tp1} := \sqrt{3} \cdot U_{ad1} \quad U_{tp1} = 361.9 \times 10^0$$

$$\cos \varphi_{tp1} := \frac{P_{tp1}}{S_{tp1}} \quad \sin \varphi_{tp1} := \frac{Q_{tp1}}{S_{tp1}} \quad \cos \varphi_{tp1} = 195.129 \times 10^{-3} \quad \sin \varphi_{tp1} = 928.197 \times 10^{-3}$$

$$\beta_1 := \frac{S_{tp1}}{S_{nt1} \cdot 10^3} \quad \beta_1 = 134.102 \times 10^{-3}$$

$$\Delta P_{t1} := 1000 \cdot (\Delta P_{xt1} + \beta_1^2 \cdot \Delta P_{kt1}) \quad \Delta P_{t1} = 243.019 \times 10^0$$

$$\Delta Q_{t1} := 1000 \cdot (\Delta Q_{xt1} + \beta_1^2 \cdot \Delta Q_{kt1}) \quad \Delta Q_{t1} = 1.563 \times 10^3$$

$$\Delta S_{t1} := \sqrt{\Delta P_{t1}^2 + \Delta Q_{t1}^2} \quad \Delta S_{t1} = 1.582 \times 10^3$$

$$R_{t1} := \frac{\Delta P_{kt1} \cdot 10^3}{S_{nt1}^2} \cdot U_{nt1}^2 \quad R_{t1} = 51.6 \times 10^{-3}$$

$$X_{t1} := \frac{U_{nt1}^2}{S_{nt1}} \cdot \frac{10 U_{kt1}}{1} \quad X_{t1} = 114.286 \times 10^{-3}$$

$$\Delta U_{t1} := \frac{R_{t1} \cdot P_{tp1} + X_{t1} \cdot Q_{tp1}}{U_{tp1}} \quad \Delta U_{t1} = 2.925 \times 10^0$$

$$U_{vtp1} := U_{tp1} \cdot kt1 + \Delta U_{t1} \quad U_{vtp1} = 5.431 \times 10^3$$

$$P_{vtp1} := P_{tp1} + \Delta P_{t1} \quad P_{vtp1} = 3.387 \times 10^3$$

$$Q_{vtp1} := Q_{tp1} + \Delta Q_{t1} \quad Q_{vtp1} = 9.405 \times 10^3$$

$$S_{vtp1} := \sqrt{P_{vtp1}^2 + Q_{vtp1}^2} \quad S_{vtp1} = 19.699 \times 10^3$$

$$R_{l1} := 0.023 \quad X_{l1} := 0.019$$

$$\Delta P_{l1} := \frac{(P_{vtp1}^2 + Q_{vtp1}^2) \cdot R_{l1}}{U_{vtp1}^2} \quad \Delta P_{l1} = 78.729 \times 10^{-3}$$

$$\Delta Q_{l1} := \frac{(P_{vtp1}^2 + Q_{vtp1}^2) \cdot X_{l1}}{U_{vtp1}^2} \quad \Delta Q_{l1} = 64.354 \times 10^{-3}$$

$$P_{lad1} := P_{vtp1} + \Delta P_{l1} \quad P_{lad1} = 3.387 \times 10^3$$

$$Q_{lad1} := Q_{vtp1} + \Delta Q_{l1} \quad Q_{lad1} = 9.405 \times 10^3$$

$$U_{l1} := \sqrt{\left[ U_{vtp1} + \frac{(P_{vtp1} \cdot R_{l1} + Q_{vtp1} \cdot X_{l1})}{U_{vtp1}} \right]^2 + \left[ \frac{(P_{vtp1} \cdot X_{l1} - Q_{vtp1} \cdot R_{l1})}{U_{vtp1}} \right]^2}$$

$$U_{l1} = 5.4315 \times 10^3 \quad U_1 = 5.4315 \times 10^3$$

$$\Delta U_{l1} := U_{l1} - U_{vtp1} \quad \Delta U_{l1} = 47.24 \times 10^{-3}$$

$$P_1 := P_{lad1} + P_{lad2ped3ad4567ped89} \quad P_1 = 218.089 \times 10^3$$

$$Q_1 := Q_{lad1} + Q_{lad2ped3ad4567ped89} \quad Q_1 = 221.683 \times 10^3$$

$$R_{cp1} := 1.024 \quad X_{cp1} := 0.828$$

$$\Delta P_{cp1} := \frac{(P_1^2 + Q_1^2) \cdot R_{cp1}}{U_1^2} \quad \Delta P_{cp1} = 3.357 \times 10^3$$

$$\Delta Q_{cp1} := \frac{(P_1^2 + Q_1^2) \cdot X_{cp1}}{U_1^2} \quad \Delta Q_{cp1} = 2.714 \times 10^3$$

$$P_{cp} := P_1 + \Delta P_{cp1} \quad P_{cp} = 221.446 \times 10^3$$

$$Q_{cp} := Q_1 + \Delta Q_{cp1} \quad Q_{cp} = 224.397 \times 10^3$$

$$U_{cp} := \sqrt{\left[ U1 + \frac{(P1 \cdot R_{cp1} + Q1 \cdot X_{cp1})}{U1} \right]^2 + \left[ \frac{(P1 \cdot X_{cp1} - Q1 \cdot R_{cp1})}{U1} \right]^2} \quad U_{cp} = 5.506 \times 10^3$$

$$\Delta U_{cp1} := U_{cp} - U1 \quad \Delta U_{cp1} = 74.917 \times 10^0$$

Суммарные значения потерь по длине отходящей линии с учётом отпаек до скважин

$$\Sigma \Delta P := \Delta P_{cp1} + \Delta P_{l1} + \Delta P_{t1} + \Delta P_{l2} + \Delta P_{l2} + \Delta P_{tp23} + \Delta P_{t32} + \Delta P_{kl3} + \Delta P_{23} + \Delta P_{34} + \Delta P_{t4} + \Delta P_{l5} + \Delta P_{t5} + \Delta P_{35} + \Delta P_{l678} + \Delta P_{t678} + \Delta P_{t82} + \Delta P_{kl8} + \Delta P_{56} + \Delta P_{l9} + \Delta P_{t91} + \Delta P_{t92} + \Delta P_{kl9}$$

$$\Sigma \Delta P = 18.836 \times 10^3$$

$$\Sigma \Delta Q := \Delta Q_{cp1} + \Delta Q_{l1} + \Delta Q_{t1} + \Delta Q_{l2} + \Delta Q_{l2} + \Delta Q_{tp23} + \Delta Q_{t32} + \Delta Q_{kl3} + \Delta Q_{23} + \Delta Q_{34} + \Delta Q_{t4} + \Delta Q_{l5} + \Delta Q_{t5} + \Delta Q_{35} + \Delta Q_{l678} + \Delta Q_{t678} + \Delta Q_{t82} + \Delta Q_{kl8} + \Delta Q_{56} + \Delta Q_{l9} + \Delta Q_{t91} + \Delta Q_{t92} + \Delta Q_{kl9}$$

$$\Sigma \Delta Q = 36.82 \times 10^3$$

$$\Sigma \Delta U := \Delta U_{cp1} + \Delta U_{l1} + \Delta U_{t1} + \Delta U_{l2} + \Delta U_{l2} + \Delta U_{tp23} + \Delta U_{t32} + \Delta U_{kl3} + \Delta U_{23} + \Delta U_{34} + \Delta U_{t4} + \Delta U_{l5} + \Delta U_{t5} + \Delta U_{35} + \Delta U_{l678} + \Delta U_{t678} + \Delta U_{t82} + \Delta U_{kl8} + \Delta U_{56} + \Delta U_{l9} + \Delta U_{t91} + \Delta U_{t92} + \Delta U_{kl9}$$

$$\Sigma \Delta U = 309.06 \times 10^0$$

$$Q9 := 13 \quad Q8 := 30 \quad Q7 := 23 \quad Q6 := 20 \quad Q51 := 31 \quad Q52 := 27.9 \quad Q53 := 3.1 \quad Q4 := 5.8 \quad Q3 := 87 \quad Q2 := 8 \quad Q1 := 11$$

$$Q := \frac{Q9 \cdot \omega9}{\omega_{nd9}} + \frac{Q8 \cdot \omega8}{\omega_{nd8}} + \frac{Q7 \cdot \omega7}{\omega_{nd7}} + \frac{Q6 \cdot \omega6}{\omega_{nd6}} + \frac{Q51 \cdot \omega51}{\omega_{nd51}} + \frac{Q52 \cdot \omega52}{\omega_{nd52}} + \frac{Q53 \cdot \omega53}{\omega_{nd53}} + \frac{Q4 \cdot \omega4}{\omega_{nd4}} + \frac{Q3 \cdot \omega3}{\omega_{nd3}} + \frac{Q2 \cdot \omega2}{\omega_{nd2}} + \frac{Q1 \cdot \omega1}{\omega_{nd1}}$$

$$Q = 377.718 \times 10^0 \quad K_{eef} := \frac{Q}{P_{cp}} \quad K_{eef} = 1.706 \times 10^{-3} \quad E1 := \frac{24 \cdot P_{cp}}{Q} \quad E1 = 14.071 \times 10^3$$

$$S_{cp} := \sqrt{P_{cp}^2 + Q_{cp}^2} \quad S_{cp} = 315.266 \times 10^3 \quad E2 := \frac{24 \cdot S_{cp}}{Q} \quad E2 = 20.032 \times 10^3$$

## Акты внедрения результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

АО «Самарская сетевая компания»

/ Кучканов А.Д.

20 24 г.



АКТ

об использовании результатов исследования

Казанцева Александра Андреевича

о влиянии дискретности регулирования напряжения питающей подстанции на потребляемую мощность электротехническими комплексами погружных насосов в АО «Самарская сетевая компания», г. Самара

Комиссия в составе:

- Галдин И.А., начальник службы эксплуатации и ремонта распределительных сетей;
- Лещенко Д.С., начальник службы грозозащиты и изоляции;

провела анализ диссертационной работы Казанцева А.А. на предмет внедрения их в АО «Самарская сетевая компания», (г. Самара) и утвердила следующее заключение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В практике эксплуатационной работы АО «Самарская сетевая компания» используются алгоритм и рекомендации по повышению надежности и эффективности электроснабжения электротехнических комплексов добывающих скважин (ЭКДС), разработанные Казанцевым А.А. в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук для решения следующих практических задач:

1. Определение оптимального напряжения питающей подстанции с трансформаторами, оснащенными устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).
2. Расчет потребляемой мощности электротехническими комплексами погружных насосов с учетом дискретности регулирования напряжения трансформаторами с РПН.
3. Учет особенностей частотных преобразователей, установленных в станциях управления погружными насосами, и механических характеристик погружных насосов в ЭКДС.
4. Применение разработанного алгоритма для расчета потребляемой мощности электротехническими комплексами погружных насосов как для неразветвленной, так и для разветвленной отходящей от питающей подстанции линии.

Начальник службы эксплуатации и  
ремонта распределительных сетей

\_\_\_\_\_ Галдин И.А.

Начальник службы грозозащиты и изоляции

\_\_\_\_\_ Лещенко Д.С.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Сетевик»

Чиркова Е.В.

« 15 » 03 20 24 г.

**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы  
Казанцева Александра Андреевича на тему «Повышение энергоэффективности  
электротехнического комплекса добычи нефти регулированием напряжения  
промышленной подстанции»  
в ООО «Сетевик», г. Самара

Настоящим актом подтверждается, что в 2023-2024 г.г. ООО «Сетевик» провело анализ возможности применения алгоритма расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с учетом особенностей частотных преобразователей станций управления погружными насосами, разработанного Казанцевым А.А.

На основании полученных результатов, в практику эксплуатации ООО «Сетевик» были внедрены разработанные Казанцевым А.А. следующие технические решения по повышению энергоэффективности и надежности эксплуатации электротехнического комплекса добывающих скважин, которые продемонстрировали свою эффективность:

— методика расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с учетом свойств частотных преобразователей станций управления и их влияния на работу погружного и наземного оборудования нефтяной скважины;

— алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции для отходящей линии, питающей электротехнический комплекс добывающих скважин;

— методика расчета приведенных затрат электрической энергии при добыче нефти погружными центробежными насосами как в случае обеспечения требуемого режима работы методом дросселирования устьевого штуцера, так и в случае применения частотного преобразователя в станции управления погружными насосами.

Главный инженер

Борисов Е.О.

Начальник службы эксплуатации  
распределительных электрических сетей

Бакетов Д.В.

