

*На правах рукописи*



**МАРТЬЯНОВ Антон Сергеевич**

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ  
ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ УСТАНОВОК ДОБЫЧИ  
НЕФТИ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСАМИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень – 2018

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Научный руководитель: **Сушков Валерий Валентинович**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Полищук Владимир Иосифович**,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Электрические станции»  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»

**Сидоренко Александр Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент, доцент 5  
кафедры электрооборудования и автоматики  
Омского автобронетанкового инженерного  
института филиала ФГКВОУ ВО «Военная академия  
материально-технического обеспечения им. генерала  
армии А.В. Хрулева» Министерства обороны РФ (г.  
Омск)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский государственный университет нефти и  
газа (национальный исследовательский университет)  
имени И.М. Губкина»

Защита состоится «21» июня 2018 года в 14 час. 00 мин. на заседании  
объединенного диссертационного совета Д 999.162.02 на базе Омского  
государственного технического университета и Омского государственного  
университета путей сообщения. Защита пройдет в Омском государственном  
техническом университете по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, корп. 6,  
ауд. 340. Тел./факс: (3812) 65-24-79, e-mail: dissov\_omgtu@omgtu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского  
государственного технического университета и на сайте [www.omgtu.ru](http://www.omgtu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью  
учреждения, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11,  
ученому секретарю объединенного диссертационного совета Д 999.162.02.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года.

Ученый секретарь объединенного  
диссертационного совета Д 999.162.02  
кандидат технических наук



О.А. Лысенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Решение проблемы обеспечения безотказной работы является необходимым условием при проектировании и эксплуатации производств с непрерывным циклом работы. Аварийная остановка ответственных механизмов технологических процессов вследствие кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ): провалов и прерываний напряжения, может привести к значительному экономическому ущербу.

Одним из важных производств с непрерывным технологическим циклом в Западной Сибири является добыча нефти, которая связывает в единый комплекс целый ряд различных динамически зависимых друг от друга систем (добычи, сбора, подготовки и транспорта нефти, поддержания пластового давления, электроснабжения). Указанные системы имеют различную степень влияния друг на друга, но сбой в любой из них может привести к недоотпуску продукции (невыполнению планов добычи нефти). Длительная остановка системы добычи может привести к нарушению работы всех систем, иерархически с ней связанных.

По целому ряду технологических показателей в условиях современной нефтедобычи установки электрических центробежных насосов (УЭЦН) являются наиболее эффективным способом извлечения нефти из пласта: фонд скважин, оборудованных УЭЦН, на 2001 год составлял 33,2% процента, а объем добываемой с помощью таких установок нефти – 65,4%.

Погружной асинхронный электродвигатель (ПЭД) УЭЦН имеет ряд конструктивных особенностей, что обуславливает его низкую устойчивость к кратковременным нарушениям электроснабжения. Уровни допустимых провалов напряжения могут находиться в пределах от 0,5 до 0,9 о.е. Установлено, что по критерию сохранения устойчивости нарушение питания даже на 0,15 секунды способно нарушить работу УЭЦН. Более того, повсеместно используемый для управления УЭЦН частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) способствует еще большему снижению устойчивости при КНЭ.

Статистика показывает, что доля КНЭ от общего количества аварий в системе электроснабжения нефтяного месторождения может достигать 48%, при этом потери нефти (недоотпуск продукции) составляют почти 5,5 тыс. тонн нефти за 1 год. В этой связи актуальной является задача снижения количества аварий, вызванных КНЭ.

Исследованиям режимов работы асинхронных электродвигателей, а также их устойчивости посвящены работы ведущих российских ученых Абрамовича Б.Н., Важнова А.И., Веникова В.А., Гамазина С.И., Гуревича Ю.Е., Гусейнова Ф.Г., Егорова А.В., Ершова М.С., Жданова П.С., Копылова И.П., Костенко М.П., Меньшова Б.Г., Пупина В.М., Сивокобыленко В.Ф., Страхова С.В., Сыромятникова И.А., Трифонова А.А., Ульянова С.А., Пиотровского Л.М., Яризова А.Д.

В последнее время интерес к проблеме повышения устойчивости к КНЭ асинхронных электродвигателей с ЧРП существенно возрос, что подтверждается работами Егорова А.В., Трифонова А.А., Белоусенко И.В., Гоппе Г.Г., Губайдуллина А.Р., Карандаевой О.И., Крылова Ю.А., Храмшина Р.Р., Храмшина Т.Р., Храмшина, В.Р., Браславского И.Я, Плотникова Ю.В., Ишматова З.Ш., Полунина Ф.А.

Следует отметить недостаточную освещенность российскими учеными темы обеспечения бесперебойной работы электродвигателей ответственных механизмов с ЧРП за счет применения в них дополнительных накопителей энергии. Данная проблема рассматривалась Рутбергом Ф.Г., Браславским И.Я., Плотниковым Ю.В., Ишматовым З.Ш., Полуниным Ф.А., Jouanne A.V., Enjeti P., Deswal, S.S., Dahiya R., Samineni S., Johnson B.K., Hess H.L., в том числе для электродвигателей установок добычи нефти Carnovale D. J., Biternas J.

Таким образом, решение проблемы повышения надежности электроснабжения асинхронных электродвигателей ответственных механизмов с преобразователями частоты, в том числе УЭЦН, является актуальной задачей, решение которой способствует как повышению надежности, так и экономической эффективности работы систем промышленного электроснабжения.

Представленная работа посвящена решению проблемы динамической устойчивости электротехнических комплексов (ЭТК) УЭЦН.

**Цель работы** заключается в повышении устойчивости ЭТК УЭЦН к провалам и прерываниям напряжения путем разработки и обоснования технических решений по снижению числа их аварийных остановок.

**Идея работы.** Для повышения устойчивости ЭТК УЭЦН необходимо применение специальных технических решений. Для научно обоснованного выбора одного или нескольких решений разработана методика, основанная на оценке ущерба от простоя УЭЦН, учитывающая распределение количества провалов и прерываний напряжения в координатах глубины и длительности, а также параметры кривой динамической устойчивости.

Реализация сформулированной цели требует решения следующих **основных задач** исследования:

- 1) разработать показатель, характеризующий устойчивость узла электрических нагрузок, который возможно использовать при определении стоимости ущерба от потери устойчивости;
- 2) выявить возможные технические решения для повышения устойчивости по напряжению ЭТК УЭЦН, оценивая их влияние на запас устойчивости по напряжению;
- 3) разработать критерии выбора оптимальных параметров накопителя энергии и сечения кабельной линии, питающей ПЭД УЭЦН, с учетом распределения количества возмущений напряжения в координатах глубины и длительности.

**Объектом исследования** является ЭТК нефтедобывающей скважины с УЭЦН.

**Методы исследования:** в работе использованы положения и методы теории электрических цепей, теории устойчивости электротехнических систем (ЭТС), проектирования систем электроснабжения электротехнических комплексов, теории электрических машин и электропривода, математического и компьютерного моделирования электромагнитных процессов в системах электроснабжения.

**Научная новизна результатов исследований:**

1. Разработан многомерный показатель устойчивости узла электрических нагрузок, отличающийся тем, что учитывает напряжение статической устойчивости, время сохранения устойчивости при прерывании напряжения, время ввода резерва и распределение количества провалов напряжения в координатах глубины и длительности.

2. Обоснованы структура и алгоритм функционирования устройства гарантированного питания управляемого привода электродвигателей ответственных механизмов, отличающегося тем, что обеспечивает подключение дополнительного источника питания (блока ионисторов) к звену постоянного тока частотно-регулируемых приводов группы УЭЦН при питании от двух независимых источников питания.

3. Обоснованы критерии выбора оптимальных сечения кабельной линии, питающей ПЭД УЭЦН, и запаса энергии двух видов накопителей энергии на основе минимизации суммарных дисконтированных затрат, отличающиеся тем, что учитывают капитальные и эксплуатационные затраты, а также ущерб от простоя УЭЦН по причине нарушений устойчивости.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Многомерный показатель устойчивости, учитывающий параметры кривой динамической устойчивости, время ввода резерва и распределение количества провалов напряжения в координатах глубины и длительности.

2. Структура и алгоритм функционирования устройства гарантированного питания, позволяющего включить емкостные накопители энергии в звено постоянного тока станций управления УЭЦН с ЧРП.

3. Критерии определения оптимальных параметров накопителя и сечения кабельной линии, питающей ПЭД УЭЦН, по минимуму дисконтированных затрат с учётом ущерба от потери устойчивости.

**Обоснованность и достоверность результатов** подтверждается корректностью исходных предположений и допущений и проведенных расчетов, базирующихся на использовании известных положений теории электрических машин, электропривода, электрических цепей, а также достаточной сходимостью теоретических результатов и результатов численного моделирования режимов ЭТС.

**Практическая ценность диссертации:**

1. Разработано оригинальное устройство гарантированного питания управляемого привода электродвигателей ответственных механизмов (патент РФ на полезную модель №163553).

2. Предложенный технико-экономический критерий выбора сечения кабельных линий, питающих УЭЦН, внедрен в производственную деятельность АО «Самотлорнефтегаз» и ПАО «Гипротюменнефтегаз».

3. Критерий сравнения технических решений для повышения динамической устойчивости используется в АО «Самотлорнефтегаз» при оценке целесообразности установки БАПР на реконструируемых ПС 35/6(10) кВ.

#### **Личный вклад автора.**

1. Разработан многомерный показатель устойчивости узла электрических нагрузок, который возможно использовать при определении ущерба от остановок добывающих скважин;

2. Разработано устройство гарантированного питания управляемого привода электродвигателей ответственных механизмов, содержащего накопитель энергии на базе ионисторов;

3. Разработаны критерии выбора оптимальных (по минимуму суммарных дисконтированных затрат, с учетом ущерба от остановок по причине потери устойчивости) сечения кабельной линии, питающей УЭЦН, и параметров накопителей энергии для повышения устойчивости.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов ОАО «Гипротюменнефтегаз» «Инновации в проектировании, строительстве и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений» (Тюмень, 2012); международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в образовании» (Нижевартоск, 2013); IX Международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2014); V Международная научно-практическая конференция «Культура, наука, образование: проблемы и перспективы» (Нижевартоск, 2016); X Международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2016); Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (Тюмень, 2017).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 2 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент РФ на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и приложений, содержит 54 рисунка, 9 таблиц, список литературы из 147 наименований. Общий объем диссертации 115 страниц.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Во введении** дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, определены объект и методы исследования, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, отмечены их научная новизна и практическая ценность, приведены структура работы и объем публикаций по теме.

**В первой главе** приведено описание схемы электроснабжения куста нефтедобывающих скважин, дана характеристика возмущений напряжения в соответствии с ГОСТ 32144, IEEE Std 1159, выполнен анализ статистики провалов напряжения, нарушения электроснабжения классифицированы по длительности, причине и месту возникновения, проведен анализ литературных источников по проблеме повышения устойчивости погружных асинхронных электродвигателей (ПЭД) к провалам и прерываниям напряжения, сформулированы задачи исследования, требующие решения.

Проведенный анализ литературных источников показал, что проблема устойчивости ЭТС нефтедобывающей промышленности исследована достаточно хорошо: разработаны адекватные математические модели элементов ЭТС, определены критерии устойчивости многомашинных систем, в том числе и смешанного состава. Однако данная проблема продолжает оставаться острой, особенно ввиду повсеместного распространения высокотехнологичных производств с частотно-регулируемым приводом, крайне чувствительных к качеству питающего напряжения. В области техники разработаны устройства для повышения динамической устойчивости: БАВР, ДКИН; описаны решения для повышения устойчивости электродвигателей с ЧРП за счет применения накопителей энергии: емкостных и инерционных.

При этом выявлено отсутствие обоснованных критериев выбора технических решений по повышению динамической устойчивости; отсутствие технико-экономического критерия выбора емкости накопителей энергии при их применении для повышения устойчивости по напряжению.

**Во второй главе** рассмотрены статистические данные по распределению количества провалов напряжения в координатах глубины и длительности, показаны способы графического представления таких данных; проведен анализ кривых динамической устойчивости (КДУ), описанных в действующих стандартах (СВЕМА, ITIC, SEMI F47), показано их существенное отличие от КДУ ЭТК УЭЦН; описана математическая модель ЭТК УЭЦН и разработан алгоритм построения КДУ УЭЦН.

Для каждого узла электрических нагрузок возможно построить кривую  $\tau=f(u_{ocm})$ , отсекающую области критических возмущений и устойчивой работы при задаваемых глубине  $\Delta U$  и длительности возмущений напряжения  $\tau$ , которую назовем кривой динамической устойчивости (КДУ).

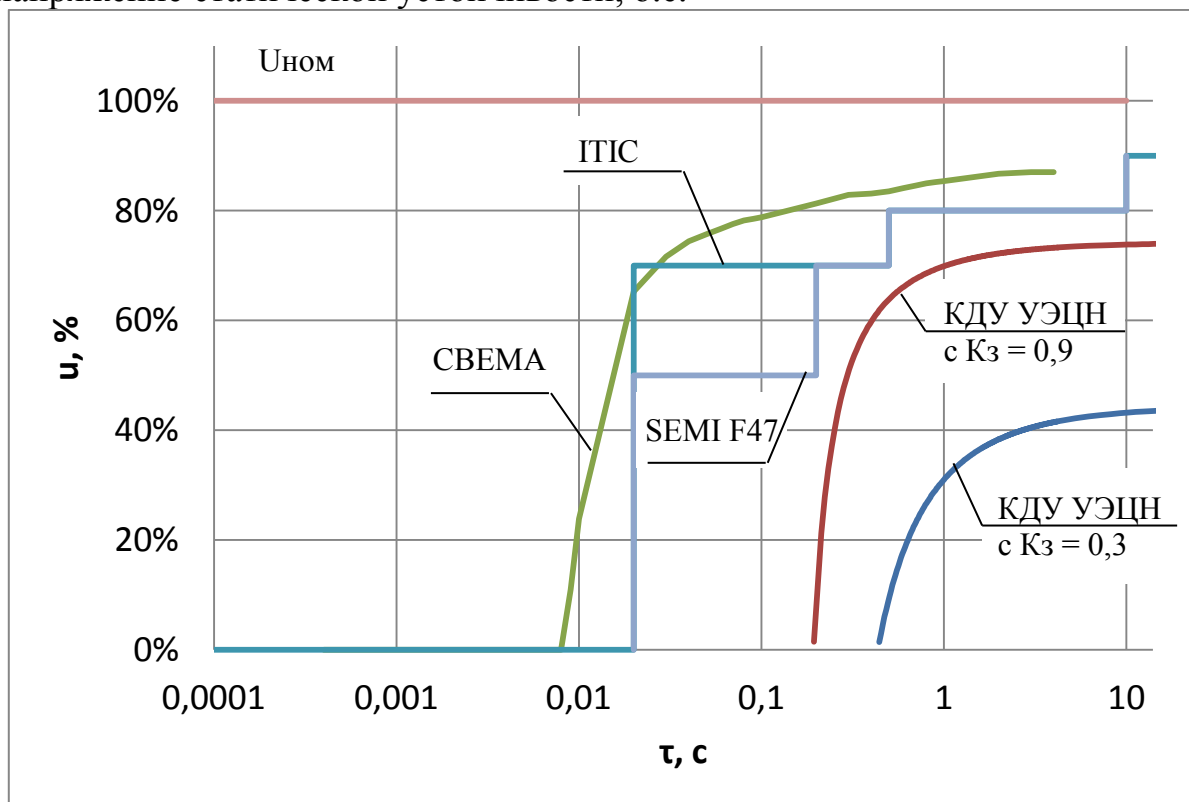
В действующих стандартах описаны различные КДУ (например, СВЕМА, ITIC, SEMI F47), имеющие конкретные области применения, однако сложная

структура ЭТК УЭЦН, значительный разброс глубин нефтяных скважин, мощностей ПЭД, трансформаторов ТМПН, коэффициентов загрузки ПЭД не позволяют использовать данные кривые для описания границы устойчивости по напряжению куста нефтяных скважин, см. рисунок 1.

В монографии Ершова М.С., Егорова А.В., Трифонова А.А. предлагается для описания КДУ при симметричных одноступенчатых провалах напряжения использовать следующую формулу:

$$\tau(u_{\text{ост}}) = \tau_0 \cdot \frac{1 - u_{\text{ост}}}{1 - \frac{u_{\text{ост}}}{u_{\text{cy}}}}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – глубина провала напряжения, с;  $\tau_0$  – запас устойчивости при прерывании напряжения до нуля, с;  $u_{\text{ост}}$  – остаточное напряжение, о.е.;  $u_{\text{cy}}$  – напряжение статической устойчивости, о.е.

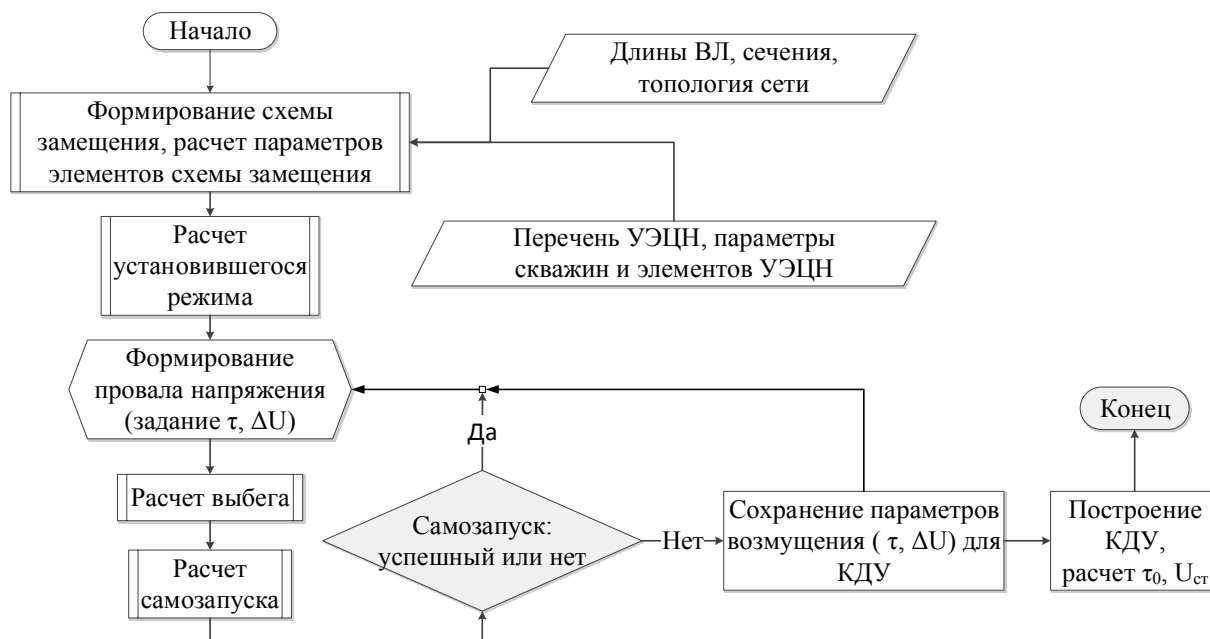


**Рисунок 1 – кривые СВЕМА, ITIC, SEMI F47, КДУ УЭЦН с коэффициентом загрузки ( $K_z$ ) 0,9 и 0,3 о.е.**

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) аппроксимированных рассчитанных по математической модели КДУ ЭТК УЭЦН к формуле (1) составил более 98%, что говорит о высокой степени достоверности. В дальнейшем для описания КДУ ПЭД будем использовать формулу (1).

Для построения КДУ принят алгоритм, представленный на рисунке 2.





**Рисунок 2 – Алгоритм построения КДУ**

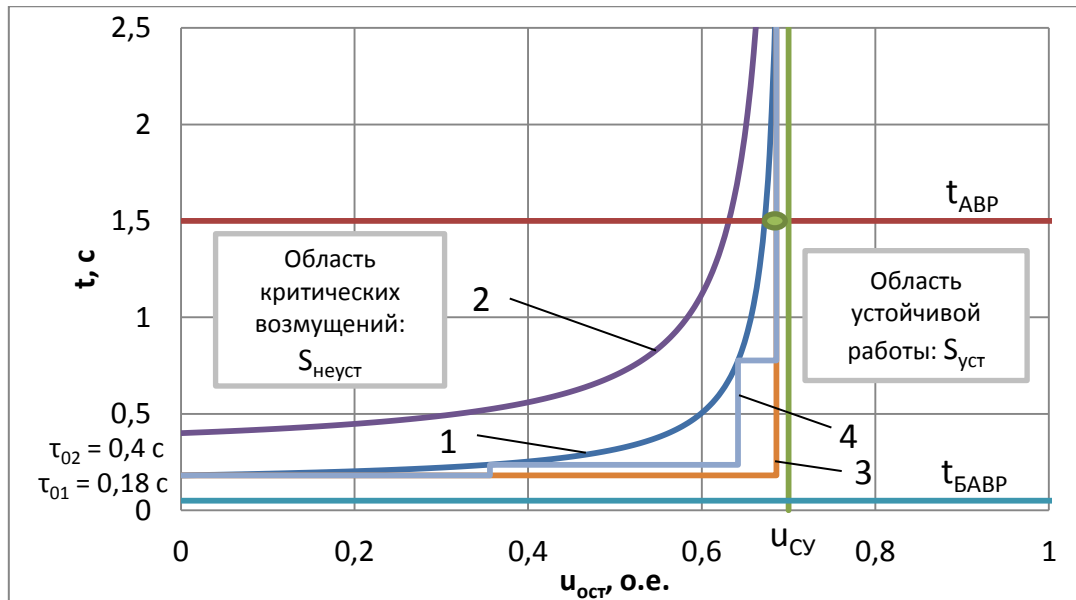
В третьей главе разработан многомерный показатель устойчивости узла нагрузки, определены критерии для выбора технического решения по повышению динамической устойчивости по напряжению при равномерном и неравномерном распределении количества провалов напряжения в координатах глубины и длительности.

В трудах ученых РГУ им. Губкина (Репиной Ю.В., профессоров Егорова А.В., Ершова М.С.) описан коэффициент запаса устойчивости по напряжению, который является функцией от времени ввода резерва  $t_{ABP}$ , времени сохранения устойчивости при прерывании напряжения  $\tau_0$ , напряжения статической устойчивости  $u_{cy}$  и остаточного напряжения  $u_{ост}$ . Мы выделяем следующие категории мероприятий увеличения запаса устойчивости по влиянию на коэффициент запаса:

1. снижение времени возмущения за счет более быстрого ввода резерва, например, с помощью быстродействующего АВР: снижение времени ввода резерва от  $t_{БАВР}$  к  $t_{ABP}$ , см. рисунок 3;

2. максимальное использование запаса устойчивости за счет максимального приближения уставки ЗМН к КДУ: например, переход от одноступенчатой к трехступенчатой ЗМН: переход от кривой 3 к кривой 4, см. рисунок 3;

3. повышение запаса устойчивости за счет повышения времени сохранения устойчивости при прерывании напряжения ( $\tau_0$ ), например, используя дополнительный источник энергии в узле нагрузки: динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН), динамический источник бесперебойного питания (ДИБП), инерционный или емкостной накопитель энергии.



**Рисунок 3 – Кривая динамической устойчивости узла асинхронной нагрузки (1 – кривая динамической устойчивости  $\tau_0 = 0,18$  с, 2 – кривая динамической устойчивости с повышенным запасом  $\tau_0 = 0,4$  с, 3 – границы срабатывания одноступенчатой защиты минимального напряжения, 4 – границы срабатывания трехступенчатой защиты минимального напряжения,  $t_{ABP}$  и  $t_{BABP}$  – время срабатывания АВР и БАПР)**

Для принятия корректного решения о реализации технического решения для повышения устойчивости по напряжению должен быть разработан показатель, характеризующий устойчивость узла электрических нагрузок, который возможно использовать при определении стоимости ущерба от потери устойчивости.

При равномерном распределении количества провалов напряжения в координатах глубины и длительности предлагаем принять в качестве критерия выбора наиболее эффективного технического решения для повышения динамической устойчивости по напряжению снижение площади неустойчивой работы  $S_{неуст}$ , т.е. повышение коэффициента запаса устойчивости. Наиболее эффективным будет вариант с наибольшим изменением  $S_{неуст}$ :

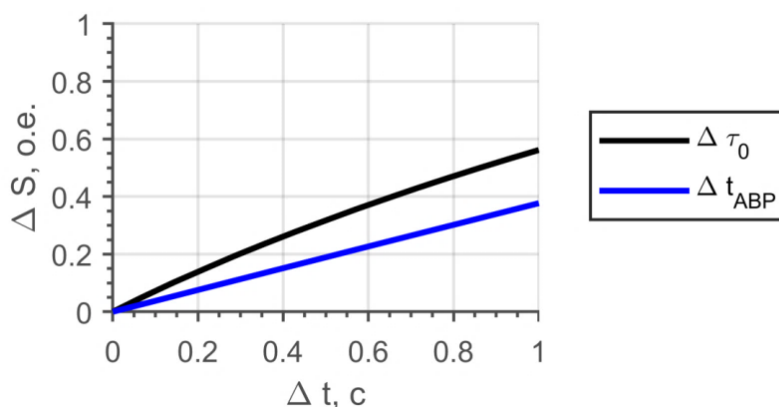
$$\Delta S_{неуст_i} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $\Delta S_{неуст_i}$  – снижение площади неустойчивой работы при реализации  $i$ -ого технического решения, о.е.:

$$\Delta S_{неуст_i} = \frac{S_{неуст_0} - S_{неуст_i}}{S_{неуст_0}}, \quad (3)$$

где  $S_{неуст_0}$  – площадь неустойчивой работы до реализации технического решений;  $S_{неуст_i}$  – площадь неустойчивой работы при реализации  $i$ -ого технического решения.

Сравнение влияния на запас устойчивости изменения времени ввода резерва и времени сохранения устойчивости при прерывании напряжения при равномерном распределении количества провалов напряжения в координатах глубины и длительности приведено на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Изменение запаса устойчивости изменении времени ввода резерва и времени сохранения устойчивости при прерывании напряжения узла нагрузки при равномерном распределении параметров возмущения напряжения**

В реальных ЭТС распределение вероятностей параметров возмущений (остаточного напряжения и времени возмущения) не является равномерным. Для узлов электрической нагрузки при оценке сравнительной эффективности технических решений, необходимо учитывать изменение количества провалов напряжения, попадающих в область неустойчивой работы.

В рамках решения сформулированной задачи разработки показателя устойчивости, предлагается для оценки устойчивости узлов нагрузки ввести в известный показатель устойчивости – запас устойчивости, новый параметр  $Z$  – количество провалов напряжения в координатах глубины и длительности, тем самым получив новый многомерный показатель устойчивости.

Физический смысл предлагаемого многомерного критерия (далее ожидаемого количества отключений) – ожидаемое годовое количество отключений, вызванных провалами напряжения с заданным распределением количества провалов напряжения в координатах глубины и длительности при единичной вероятности срабатывания противоаварийной автоматики.

Расчет количества провалов напряжения, попадающих в область неустойчивой работы, выполняется по следующему алгоритму. Построим поверхность  $Z' = f(u_{ост}, \tau)$  нормированного среднегодового количества возмущений на основе результатов измерений характеристик провалов напряжения, например, для смешанных (кабельных и воздушных) электрических сетей по ГОСТ 32144, разделив на площадь  $S_{инт}$  рассматриваемого интервала:

$$S_{инт} = \Delta u_{ост} \cdot \Delta \tau, \quad (4)$$

где  $\Delta u_{ост}$  – разница между начальной границей рассматриваемого интервала и его конечной границей по напряжению;  $\Delta \tau$  – разница между начальной границей рассматриваемого интервала и его конечной границей длительности динамического снижения напряжения.

Далее рассчитывается объем  $V_{неуст}$ , ограниченный поверхностью нормированного количества возмущений  $Z'$  и плоскостями времени ввода резерва, и КДУ:

$$V_{\text{неуст}} = \int_0^{B_e} de \int_{\tau(U_{\text{ост}})}^{t_{\text{ABP}}} dt \int_0^{Z(U_{\text{ост}}, t)} dZ, \quad (5)$$

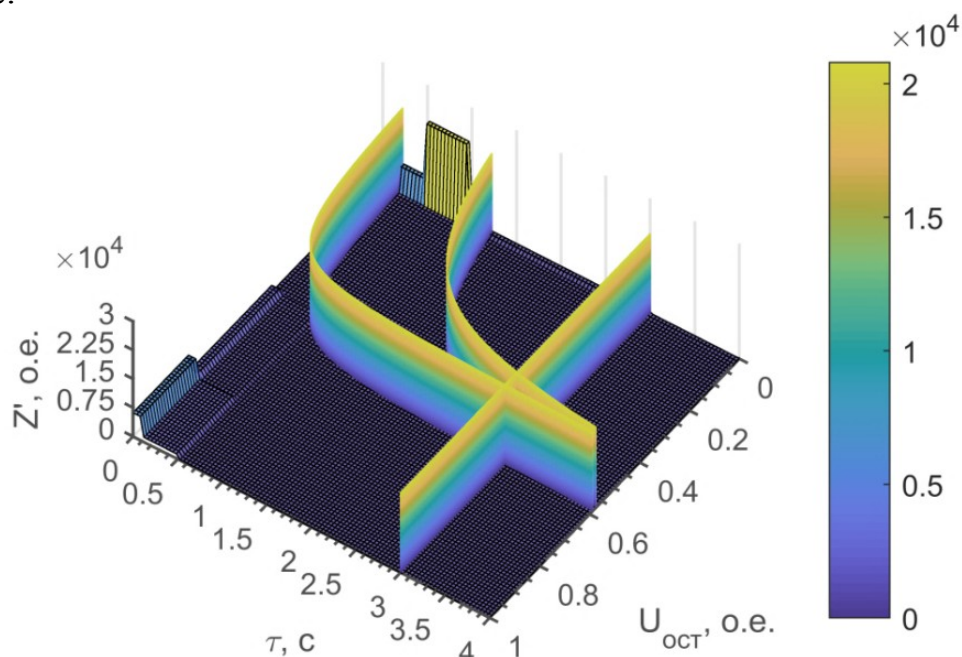
где  $B_e$  – абсцисса точки пересечения графиков срабатывания ЗМН и времени ввода резерва, см. рисунок 3;  $\tau(U_{\text{ост}})$  – функция, описывающая КДУ.

Расчет объема  $V_{\text{неуст}}$  производится методом Монте-Карло.

Наиболее эффективным будет вариант с наибольшим изменением  $V_{\text{неуст}}$ :

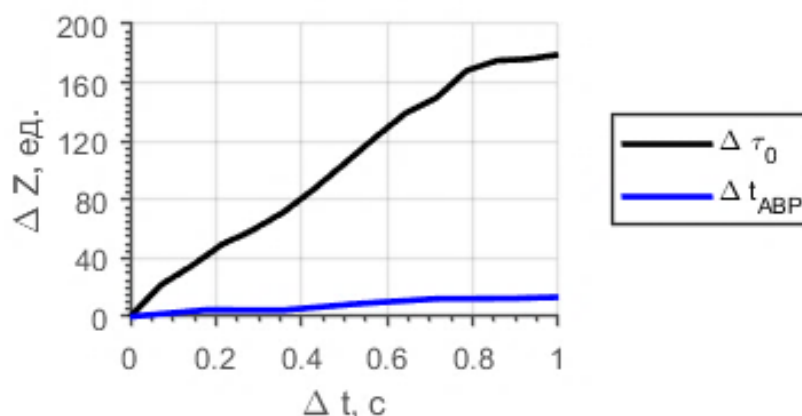
$$\Delta V_{\text{неуст}} \rightarrow \max \quad (6)$$

На рисунке 5 построены поверхность нормированного среднегодового количества возмущений, КДУ с временем сохранения устойчивости при прерывании напряжения  $\tau_0$  равным 0,18 с и 1,18 с и кривая времени ввода резерва с  $t_{\text{ABP}}$  равным 3 с, напряжение статической устойчивости  $u_{\text{cy}}$  равно 0,659 о.е.



**Рисунок 5 – Поверхности нормированного среднегодового количества возмущений, кривые динамической устойчивости с временем сохранения устойчивости при прерывании напряжения  $\tau_0$  равным 0,18, 1,18 с и кривая времени ввода резерва  $t_{\text{ABP}}$  равным 3 с, напряжение статической устойчивости  $u_{\text{ст}} = 0,659$  о.е.**

Сравнение влияния на ожидаемое количество отключений из-за провалов напряжения изменения времени ввода резерва и времени сохранения динамической устойчивости при прерывании напряжения с учетом распределения параметров возмущения напряжения приведено на рисунке 6. Установлено, что изменение коэффициента запаса устойчивости по напряжению может быть в десять раз больше, чем изменение реального количества отключений по причине потери устойчивости, при том же изменении рассматриваемого параметра, например, времени ввода резерва.



**Рисунок 6 - Сравнение влияния изменения времени ввода резерва и запаса электроэнергии узла нагрузки при неравномерном распределении параметров возмущения напряжения (количество отключений)**

В современных экономических условиях оценка эффективности вложенных средств должна осуществляться с учетом дисконтирования денежных потоков. Затраты на реализацию технического решения будут складываться из капитальных вложений и издержек:

$$\text{ЧДД} = Z = K + \sum_{t=1}^{T_p} I (1 + E)^{-t}, \quad (7)$$

где  $K$  – капитальные вложения в реализацию технического решения, руб.;  $T_p$  – расчетный период, лет;  $I$  – ежегодные издержки, тыс. руб./год;  $E$  – ставка дисконта.

Для рассматриваемой задачи издержки будут определяться по формуле:

$$I = I_1 + I_2 + I_3, \quad (8)$$

где  $I_1$  – стоимость ущерба от остановки технологического процесса добычи нефти из-за динамических снижений напряжения (упущенная прибыль), тыс. руб.;  $I_2$  – стоимость технического обслуживания, устанавливаемого оборудования, тыс. руб.;  $I_3$  – стоимость потерь электроэнергии, тыс. руб.

Стоимость ущерба от остановки добычи нефти определяется по формуле:

$$I_1 = Y_1 + Y_2 + Y_3, \quad (9)$$

где  $Y_1$  – ущерб потребителю, соответствующий увеличению условно-постоянных расходов в себестоимости нефти;  $Y_2$  – ущерб потребителю, соответствующий потери прибыли;  $Y_3$  – ущерб потребителю, обусловленный недоотпуском нефти смежным отраслям промышленности.

В стоимости ущерба от остановки УЭЦН при возмущениях напряжения учтем только  $Y_2$  – упущенную прибыль нефтедобывающего предприятия, как имеющую самый значительный вес в современных экономических условиях:

$$I_1 = Y_2 = m \cdot D_{cp} \cdot T_{пр} \cdot (N - B), \quad (10)$$

где  $m$  – ожидаемое количество отключений УЭЦН в год;  $D_{cp}$  – средний дебит скважины по нефти, т/ч;  $T_{пр}$  – время простоя УЭЦН, ч;  $N$  – оптовая цена нефти, руб./т;  $B$  – себестоимость нефти, руб./т.

Количество отключений УЭЦН  $m$  при провалах напряжения рассчитываем по формуле (5).

В четвертой главе приведены расчётные зависимости допустимых значений глубины и длительности провалов напряжения по критерию сохранения устойчивости УЭЦН при различных сечениях питающей кабельной линии, нагрузках насоса, мощностях скважинного трансформатора; обоснованы критерии выбора оптимального сечения кабельных линий, питающих УЭЦН, а также выбора оптимальных параметров накопителя энергии для повышения динамической устойчивости по минимуму суммарных приведенных капитальных и эксплуатационных затрат; обоснованы структура и алгоритм функционирования устройства гарантированного питания ЧРП электродвигателей ответственных механизмов, содержащего накопитель энергии на базе ионисторов.

Проведенные расчеты показывают значительное влияние технических параметров ЭТК УЭЦН на КДУ, а значит и запас устойчивости по напряжению.

На рисунках 7, 8, 9 построены КДУ для ПЭД 90 кВт при различных глубинах подвеса ПЭД, коэффициентах загрузки, сечениях внутрискважинной КЛ.

Наибольшее влияние на коэффициент запаса устойчивости по напряжению оказывает коэффициент загрузки ПЭД: чем больше коэффициент загрузки, тем больше напряжение статической устойчивости.

В рамках решения сформулированной задачи определения оптимального сечений кабельной линии использовать метод прямого технико-экономического сравнения вариантов (взамен метода экономической плотности тока, потерявшего свою актуальность): для каждого из рассматриваемых сечений КЛ определяются суммарные капитальные и эксплуатационные затраты с учетом дисконтирования; выбирается сечение с наименьшими затратами.

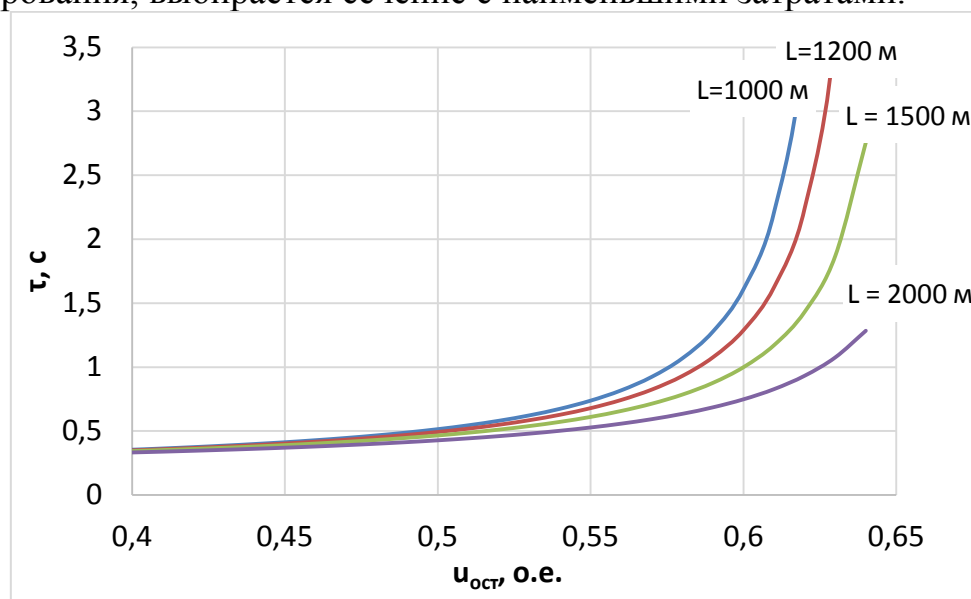


Рисунок 7 – КДУ ПЭД 90 кВт при глубинах подвеса ( $L$ ) 1000, 1200, 1500, 2000 м

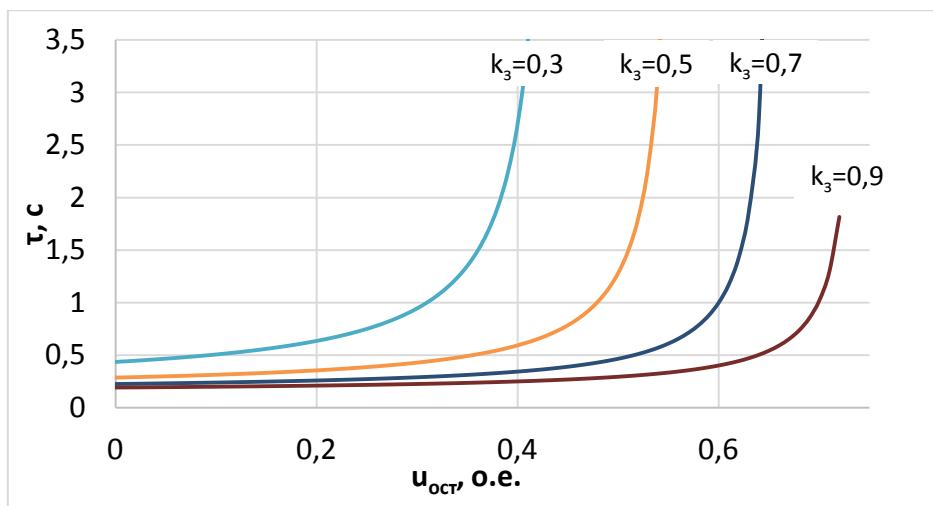


Рисунок 8 – КДУ ПЭД 90 кВт при коэффициентах загрузки ( $k_3$ ) равных 0,3, 0,5, 0,7 и 0,9 о.е.

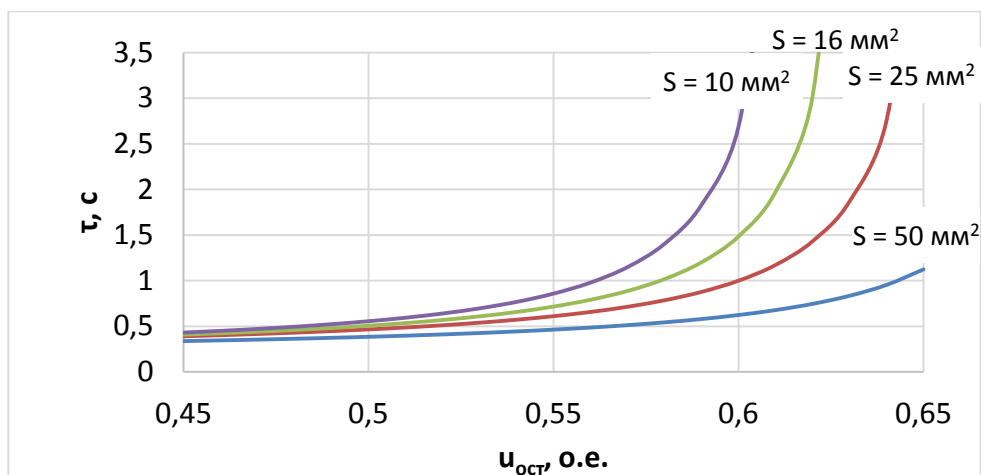


Рисунок 9 – КДУ ПЭД 90 кВт при сечениях ( $S$ ) внутрискважинной кабельной линии 10, 16, 25, 50 мм<sup>2</sup>

Для экономические издержки при определении оптимального сечения кабельной линии (см. формулу (7)) определяются по формуле:

$$И = И_{\Delta W} + И_a + И_p, \quad (11)$$

где  $И_{\Delta W}$  – стоимость потерь электроэнергии, тыс. руб.;  
 $И_a$  – эксплуатационные расходы на амортизацию, тыс. руб.;  
 $И_p$  – эксплуатационные расходы на текущий ремонт, тыс. руб.  
 Таким образом, издержки можно определить по формуле:

$$И = \beta \cdot 3 \cdot I_{нб}^2 \cdot \rho \cdot \frac{l}{F} \tau + \alpha_3 \cdot K, \quad (12)$$

где  $\beta$  – цена электроэнергии, тыс. руб./(кВт·ч);  $I_{нб}$  – наибольший рабочий ток в линии, А;  $\rho$  – удельное сопротивление материала кабеля, Ом·мм<sup>2</sup>;  $l$  – длина кабельной линии, м;  $F$  – сечение кабельной линии, мм<sup>2</sup>;  $\alpha_3$  – коэффициент затрат на текущий ремонт и амортизацию;  $\tau$  – время наибольших потерь.

Время наибольших потерь приближенно можно определить по формуле:

$$\tau = (0,124 + T_{max} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760, \quad (13)$$



Таким образом, затраты для каждого рассматриваемого сечения КЛ определяются по следующей формуле:

$$3(S) = Kl + \sum_{t=t_0}^{T_p} \left( \beta_t 3\rho \frac{l}{S} \tau_t \cdot 10^{-4} \cdot I_t^2 + \alpha_3 Kl \right) (1 + E)^{-t}, \quad (14)$$

С учетом ущерба от остановок добывающих скважин (по формуле (10)) формула (14) примет вид:

$$3(S) = K(S) \cdot l + \sum_{t=t_0}^{T_p} \left( \beta_t 3\rho \frac{l}{S} \tau_t \cdot 10^{-4} \cdot I_t^2 + \alpha_3 K(S)l + m(S) \cdot D_{\text{ср}} \cdot T_{\text{пр}} \cdot (N - B) \right) \cdot (1 + E)^{-t}, \quad (15)$$

Результаты расчетов выбора кабельной линии по критерию минимума дисконтированных затрат по формуле (14) и (15) приведены на рисунке 10.

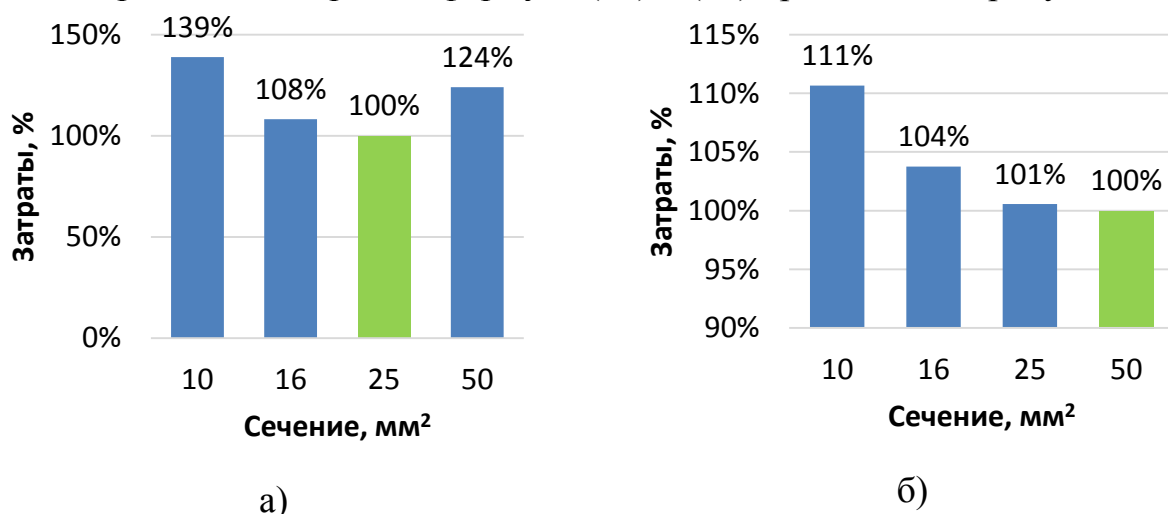


Рисунок 10 – Результаты расчета дисконтированных затрат для выбора сечения кабельной линии методом прямого технико-экономического сравнения вариантов (а), в том числе с учетом ущерба от потери устойчивости (б)

При включении накопителя энергии в схему питания куста нефтяных скважин для повышения динамической устойчивости УЭЦН увеличивается время сохранения устойчивости при прерывании напряжения ( $\tau_0$ ), при этом напряжение статической устойчивости не изменяется, в связи с ограниченных запасом энергии накопителя. При этом формула (1) для описания КДУ ЭТК УЭЦН с накопителем энергии примет вид:

$$\tau(u_{\text{ост}}) = (\tau_0 + \tau_n) \cdot \frac{1 - u_{\text{ост}}}{1 - \frac{u_{\text{ост}}}{u_{\text{сн}}}}, \quad (16)$$

где  $\tau_n$  – время разрядки накопителя при прерывании напряжения на нагрузку узла.



Для емкостного накопителя  $\tau_n$  время разрядки при провале напряжения до нуля определится:

$$\tau_n = \frac{1}{P_{\text{нагр}}} \cdot \frac{C}{2} \cdot (U_1^2 - U_2^2), \quad (17)$$

где  $C$  – емкость накопителя, Ф;  $U_1$  – напряжение накопителя, В;  $U_2$  – минимальное напряжение накопителя, В;  $P_{\text{нагр}}$  – мощность нагрузки, Вт.

Для инерционного накопителя:

$$\tau_n = \frac{1}{P_{\text{нагр}}} \cdot \frac{J}{2} \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2), \quad (18)$$

где  $J$  – момент инерции накопителя, Н·м·с<sup>2</sup>;  $\omega_1$  – скорость накопителя, рад/с;  $\omega_2$  – минимальная скорость накопителя (определяется паспортными данными накопителя), рад/с;  $P_{\text{нагр}}$  – мощность нагрузки, Вт.

Допустим, что зависимость капитальных вложений на установку накопителя является непрерывной линейной функцией:

$$K = a \cdot E_{\text{накоп}} + b, \quad (19)$$

где  $a$  – часть капитальных затрат, пропорциональная энергии накопителя, руб./(кВт·ч);  $E_{\text{накоп}}$  – энергия накопителя, кВт·ч;  $b$  – капитальные вложения, не зависящие от мощности накопителя, руб.

Энергия  $E_{\text{накоп}C}$  емкостного накопителя определяется по формуле:

$$E_{\text{накоп}C} = \frac{C}{2} \cdot (U_1^2 - U_2^2) \quad (20)$$

Для инерционного накопителя энергия  $E_{\text{накоп}J}$  рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{накоп}J} = \frac{J}{2} \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (21)$$

В соответствии с формулами (7), (10) суммарные дисконтированные затраты, учитывающие снижение упущенной прибыли нефтедобывающего предприятия, определяются по формуле:

$$Z(E_{\text{накоп}}) = a \cdot E_{\text{накоп}} + b + \sum_{t=t_0}^{T_p} (m(E_{\text{накоп}}) \cdot D_{\text{ср}} \cdot T_{\text{пр}} \cdot (N - B)) \cdot (1 + E)^{-t}, \quad (22)$$

где  $m(E_{\text{накоп}})$  – функция зависимости ожидаемого количества отключений от энергии накопителя, которая описывается полиномиальной функцией:

$$m(E_{\text{накоп}}) = m_1 \cdot E_{\text{накоп}}^2 - m_2 \cdot E_{\text{накоп}} + m_3, \quad (23)$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$  – константы.

Итоговая формула для определения затрат с учетом полиномиальной зависимости количества возмущений от энергии накопителя примет вид:

$$Z(C) = a \cdot E_{\text{накоп}} + b + \sum_{t=t_0}^{T_p} ((m_1 \cdot E_{\text{накоп}}^2 - m_2 \cdot E_{\text{накоп}} + m_3) \cdot D_{\text{ср}} \cdot T_{\text{пр}} \cdot (N - B)) \cdot (1 + E)^{-t}, \quad (24)$$

На рисунке 11 приведены результаты сравнения вариантов установки накопителя с различной емкостью и базового варианта (показана разница  $\Delta Z$

суммарных дисконтированных затрат базового и рассматриваемого варианта, при положительном значении  $\Delta Z$  установка накопителя более выгодная).

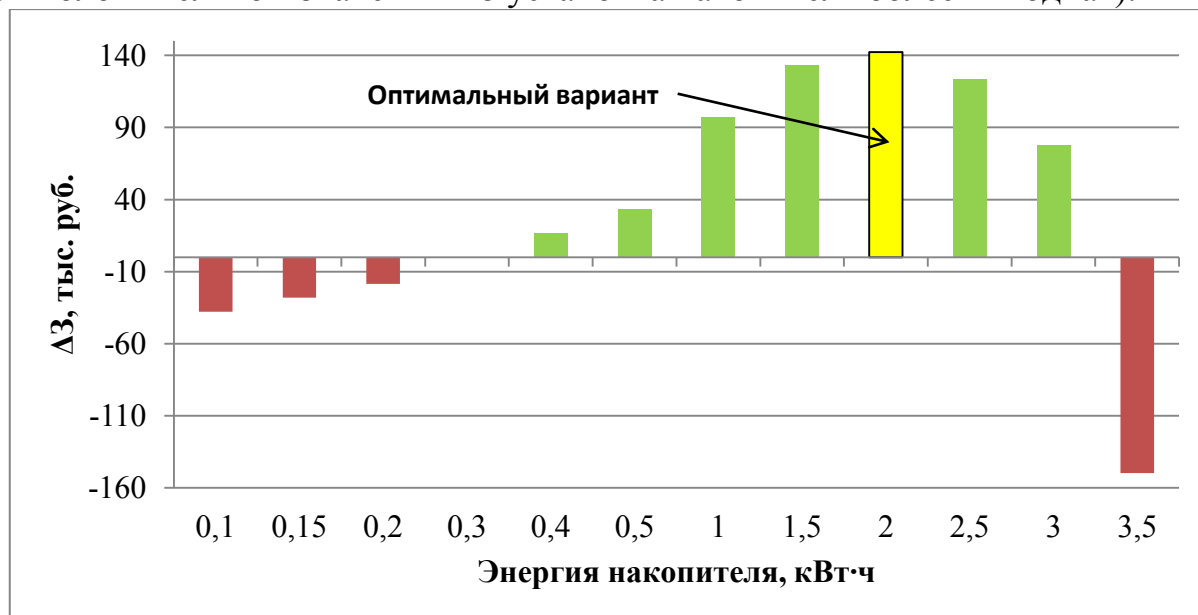


Рисунок 11 – Результат сравнения вариантов установки накопителя с различным запасом энергии и базового варианта (без накопителя)

В рамках исследования были выполнены расчеты для определения областей с экономическим эффектом от установки накопителя.

На рисунке 12 построена граница целесообразности использования накопителя для повышения динамической устойчивости в координатах удельной стоимости и общего количества нарушений рассматриваемого узла ЭТК УЭЦН. Применение накопителя энергии при удельной стоимости более 2 млн. руб./кВт·ч нецелесообразно ввиду низкой вероятности количества провалов напряжения более 10 ед./год.

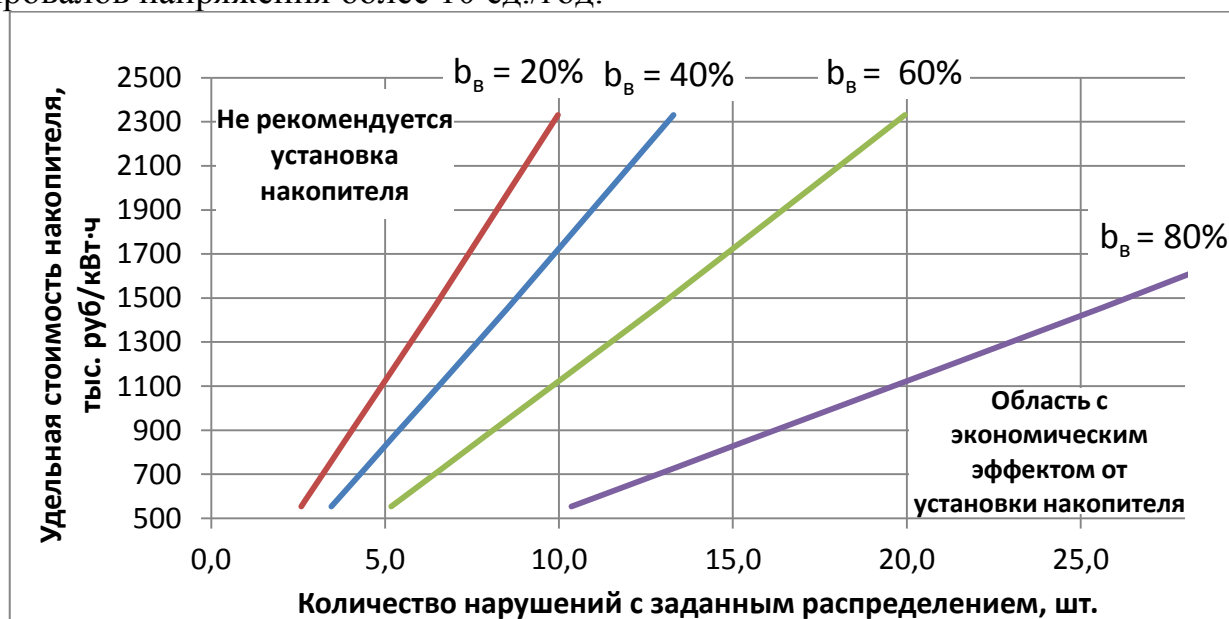
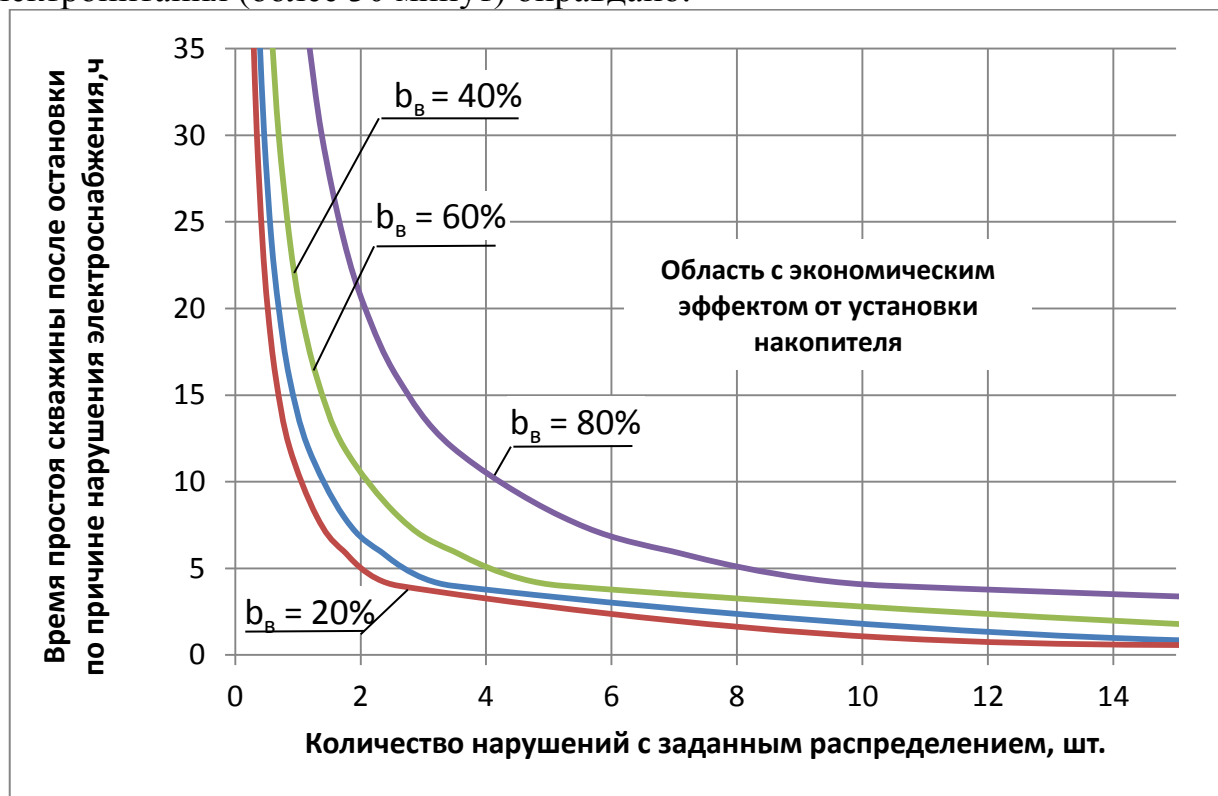


Рисунок 12 – Граница целесообразности использования накопителя для повышения динамической устойчивости в координатах удельной стоимости и общего количества нарушений рассматриваемого узла ЭТК УЭЦН при различной обводненности нефти ( $b_v$ )

На рисунке 13 построена граница целесообразности использования накопителя для повышения динамической устойчивости в координатах времени простоя при отключении УЭЦН по причине потери устойчивости при провале напряжения и общего количества нарушений рассматриваемого узла ЭТК УЭЦН при различной обводненности. Снижение времени запуска (самозапуска) ПЭД после отключения с 4 ч до 30 минут делает применение накопителя энергии нецелесообразным, при увеличении времени запуска эффективность применения накопителей энергии растет экспоненциально.

Таким образом, применение накопителей энергии для скважин, оборудованных УЭЦН, с низкой обводненностью, а также ЭТК УЭЦН с высокой вероятностью отказа и длительным временем восстановления электропитания (более 30 минут) оправдано.



**Рисунок 13 – Граница целесообразности использования накопителя для повышения динамической устойчивости в координатах времени простоя при отключении УЭЦН по причине потери устойчивости при провале напряжения и общего количества нарушений рассматриваемого узла ЭТК УЭЦН при различной обводненности нефти ( $b_v$ )**

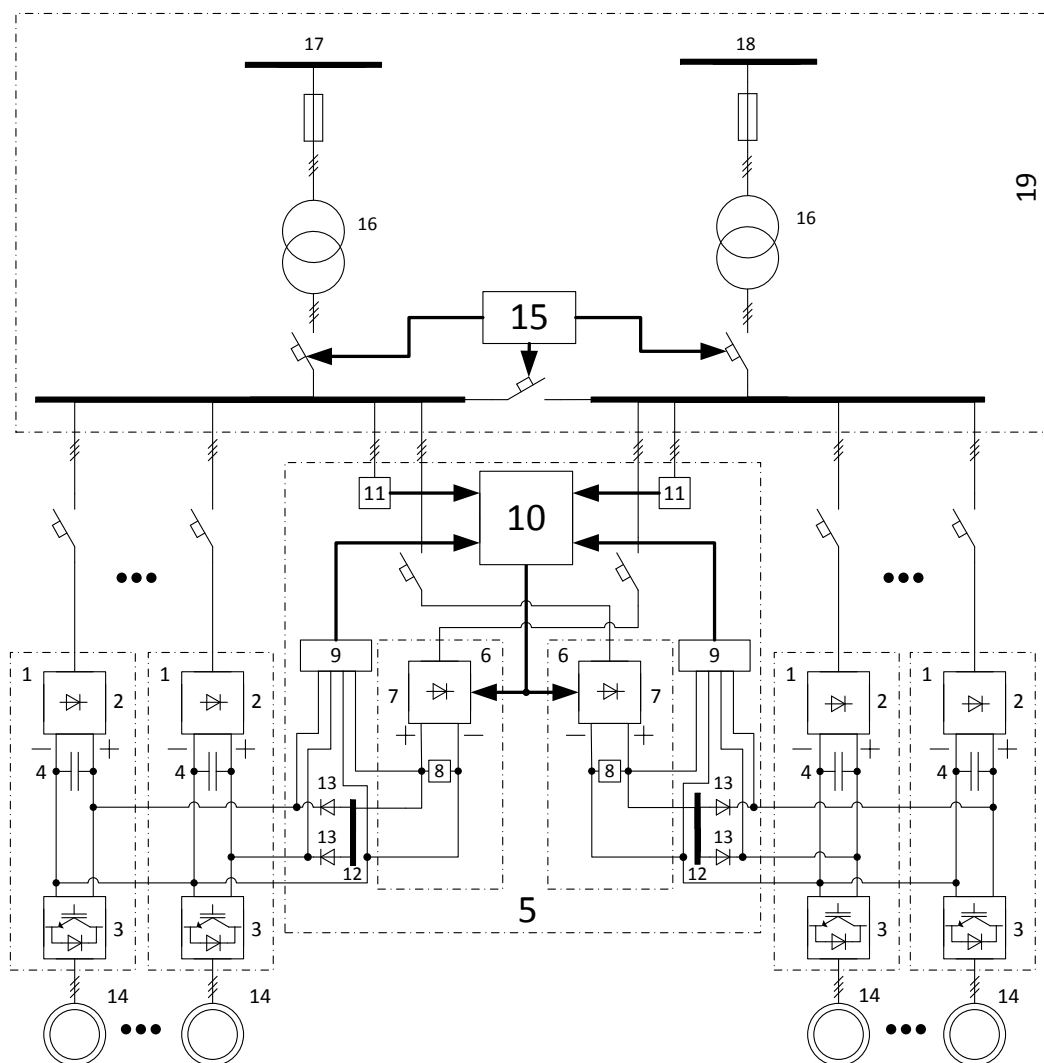
Можно разделить технические решения на снижающие время действия возмущения  $t_{ABP}$ : автоматический ввод резерва (ABP) и быстродействующий АВР (БАВР); и повышающие запас энергии ( $\tau_0$ ) узла нагрузок на момент до возникновения возмущения. К последним относятся: источники бесперебойного питания (ИБП) различных конструкций, дизельные (ДЭС) и прочие малые электростанции, динамические компенсаторы искажений напряжения (ДКИН) и динамические источники бесперебойного питания (ДИБП), совмещающие в себе ДЭС и инерционный накопитель.

С учетом того, что питание кустов нефтяных скважин, как правило, осуществляется по первой или второй категории по надежности электроснабжения, техническое обслуживание электрооборудования кустов скважин затруднено в связи со значительной распределенностью сетей электроснабжения нефтяных месторождений, запас устойчивости УЭЦН крайне низкий, а работа аккумуляторов в условиях севера Западной-Сибири отягощается суровыми погодными условиями, то наиболее эффективными техническими решениями считаем применение БАВР и ДКИН. Следует отметить, что эффективность БАВР, в том числе, тем выше, чем ниже коэффициент зависимости источников питания.

Для повышения динамической устойчивости УЭЦН с частотно-регулируемым приводом в связи с низкой инерцией ротора, большим диапазоном применяемых мощностей УЭЦН, с учетом возможности установки для уже смонтированных СУ наиболее предпочтительными являются применение БАВР и накопителей энергии. Для высокодебетных скважин с низкой обводненностью целесообразно совместное применение накопителей энергии и БАВР.

Рациональным решением для включения емкостного накопителя в электрическую схему куста скважин (минимальная модернизация существующей системы питания) является предлагаемое устройство гарантированного питания управляемого привода электродвигателей ответственных механизмов, приведенное на рисунке 14.

На рисунке 14 приняты следующие обозначения: 1 – преобразователь частоты электродвигателя ответственного механизма; 2 – выпрямитель преобразователя частоты; 3 – инвертор преобразователя частоты; 4 – емкостной фильтр преобразователя частоты; 5 – устройство гарантированного питания; 6 – источник резервного питания устройства гарантированного питания; 7 – выпрямитель источника резервного питания; 8 – накопитель энергии (например, блок ионисторов); 9 – датчики напряжения постоянного тока; 10 – блок управления; 11 – датчики напряжения переменного тока; 12 – шина постоянного тока; 13 – диод; 14 – электродвигатель ответственного механизма; 15 – автоматический ввод резерва; 16 – трансформатор 35-6(10)/0,4 кВ; 17 – первый источник электроснабжения; 18 – второй источник электроснабжения; 19 – комплектная трансформаторная подстанция 35-6(10)/0,4 кВ.



**Рисунок 14 – устройство гарантированного питания управляемого привода электродвигателей ответственных механизмов**

При кратковременном нарушении электроснабжения на первом вводе система автоматического управления переключается в аварийный режим работы. Источником поддержания напряжения звена постоянного тока преобразователей частоты первой группы АД является емкостной фильтр 4, по мере его разряда напряжение емкостного фильтра снижается, и открывается диод 13, источником питания становится накопитель энергии 8 первого источника резервного питания 6. При снижении напряжения накопителя энергии ниже допустимой уставки по напряжению питание первой группы АД переводится на выпрямитель 7, то есть на шины второго источника питания. При этом нарушения работы ответственных механизмов не происходит. При восстановлении питания посредством АВР или других средств система автоматического управления с помощью выпрямителя 7 обеспечивает плавную зарядку накопителя энергии 8 с установкой напряжения плюсового вывода на уровне ниже напряжения звена постоянного тока преобразователя частоты 1, диоды 13 закрываются. Питание системы возвращается к нормальному режиму работы.

При кратковременном нарушении питания на втором вводе действия системы управления аналогичны.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

1. Предложен многомерный показатель оценки устойчивости, учитывающий напряжение статической устойчивости, время сохранения устойчивости при прерывании напряжения, время ввода резерва и распределение количества провалов напряжения в координатах глубины и длительности. Данный показатель можно использовать для технико-экономического сравнения вариантов технических решений для повышения устойчивости по напряжению.

2. Установлено, что наиболее эффективными техническими решениями для повышения устойчивости ЭТК УЭЦН являются установка БАВР и накопителей энергии, подключаемых к выводам звена постоянного тока ЧРП УЭЦН. Для высокодебитных скважин с низкой обводненностью целесообразно совместное применение накопителей энергии и БАВР. Разработано и запатентовано устройство гарантированного питания с емкостными накопителями энергии для погружных электродвигателей с частотно-регулируемым приводом.

3. Предложены технико-экономические критерии выбора сечения кабельной линии, питающей ПЭД УЭЦН, а также выбора параметров накопителя энергии для повышения динамической устойчивости ЭТК УЭЦН по напряжению, учитывающие распределение количества провалов напряжения в координатах глубины и длительности. Данные критерии внедрены в производственную деятельность АО «Самотлорнефтегаз» и ПАО «Гипротюменнефтегаз», в том числе при обосновании применения БАВР на ПС 35/6(10) кВ.

4. Обоснована необходимость применения накопителей энергии для скважин, оборудованных УЭЦН, с низкой обводненностью добываемой жидкости, а также ЭТК УЭЦН с высокой вероятностью отказа и длительным временем восстановления электропитания (более 30 минут).

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Мартьянов А. С. Выбор экономически обоснованного сечения проводов и жил кабелей линий электропередачи при проектировании / В. П. Фрайштетер, А. С. Мартьянов // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 4. – С. 117–121.

2. Мартьянов А. С. Выбор экономически обоснованного сечения проводов и жил кабелей линий электропередачи при проектировании / В. П. Фрайштетер, А. С. Мартьянов // Энергетика Тюменского региона. – 2011. – № 2(52). – С. 53–59.

3. Мартянов А. С. Бесперебойное электроснабжение УЭЦН / В. В. Сушков, А. С. Мартянов // Информационные ресурсы в образовании : материалы Международной научно-практической конференции (г. Нижневартовск, 17 – 19 апреля 2013 г.) / ред. Т. Б. Казиазмедов. – Нижневартовск, 2013. – С. 176–178.
4. Martianov A. S. Specific of Ride Through Solutions for Electric Submerisable Pumps with Adjustable Speed Drive / V. V. Sushkov, A. S. Martianov // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk: IEEE, 2014. – P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005681.
5. Мартянов А. С. Особенности обеспечения динамической устойчивости установок электроцентробежных насосов с частотно-регулируемым приводом / В. В. Сушков, А. С. Мартянов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – С. 354–357.
6. Мартянов А. С. Кратковременные нарушения электроснабжения в электрических сетях нефтяных месторождений / А. С. Мартянов, В. В. Сушков, И. С. Небилович // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы V Международной научно-практической конференции (г. Нижневартовск, 09-10 февраля 2016 года) / Отв. ред. А. В. Коричко. – Нижневартовск, 2016. – Ч. II. – С. 123–126.
7. **Устройство гарантированного питания управляемого привода электродвигателей ответственных механизмов : пат. 163553 RU : МПК H02J 9/06 (2006.01) / Сушков В.В., Мартянов А.С. – № заявки 2015138527/07; опубл. 27.07.2016.; Бюл. № 21 – С. 2.**
8. Мартянов А. С. Разработка методики оценки эффективности мероприятий повышения динамической устойчивости по напряжению / А. С. Мартянов, В. В. Сушков // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России. – Москва : РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2016. – 337 с.
9. Мартянов А. С. Повышение устойчивости по напряжению: классификация и сравнение мероприятий / А. С. Мартянов, В. В. Сушков // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – № 1. – С. 119 – 122.
10. Martianov, A.S. Ride-through solutions: Classification and comparison / A. S. Martianov, V. V. Sushkov // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – IEEE, 2016. – С. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819046.
11. Мартянов А. С. Создание отказоустойчивой системы питания установок электроцентробежных насосов с частотно-регулируемым приводом на основе современных накопителей энергии / А. С. Мартянов, В. П. Фрайштетер, В. В. Сушков // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 109–112.
12. Мартянов А. С. Оценка динамической устойчивости погружных установок электроцентробежных насосов / Ф. А. Лосев, А. С. Мартянов, В. В.

Сушков // Актуальные вопросы энергетики : материалы Международной научно-практической конференции. – Омск, 2017. – С. 4.

13. Мартьянов А. С. Оценка влияния сечения питающего кабеля на устойчивость погружного электродвигателя / Ф. А. Лосев, А. С. Мартьянов // Новые технологии – нефтегазовому региону : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Тюмень, 2017. – С. 229–232.

14. Мартьянов А. С. Обоснование технических решений для повышения динамической устойчивости установок добычи нефти с электрическими центробежными насосами / А. С. Мартьянов, В. В. Сушков // Омский научный вестник. – 2017. – № 6 (156). – С. 105–111.

15. Мартьянов А. С. Применение накопителей энергии для повышения динамической устойчивости электропогружных установок добычи нефти / А. С. Мартьянов, Ф. А. Лосев, В. В. Сушков // Промышленная энергетика. – 2018. – № 1. – С. 7–12.

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 21.04.2018 г. Формат 60x84/16. Заказ 299. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в типографии «БК»

625000, г. Тюмень, ул. 50 лет ВЛКСМ, дом 15, корпус 1, тел. (3452) 56-40-41