

Для цитирования

Руди Д. Ю. Проблема качества электроэнергии судовых электроэнергетических систем // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 40–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-40-43.

Статья поступила в редакцию 26.01.2018 г.

© Д. Ю. Руди

**РУДИ Дмитрий Юрьевич**, ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта (филиал) «Сибирского государственного университета водного транспорта».

SPIN-код: 5222-7906

УДК 621.3.07

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-43-47

**А. Д. ДУБКОВА**  
**С. Ю. ДОЛИНГЕР**  
**Д. С. ОСИПОВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## МЕТОДЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДУГОГАСЯЩЕГО РЕАКТОРА

В статье рассмотрен способ автоматической подстройки регулируемого дугогасящего реактора, использующий переходную характеристику контура нулевой последовательности распределительной сети для определения собственной частоты и параметров контура. В данном способе используется вейвлет-преобразование и непараметрический анализ для определения собственной частоты контура нулевой последовательности. Представлены результаты работы способа автоматической подстройки дугогасящего реактора при использовании различных алгоритмов непараметрического анализа при определении собственной частоты.

**Ключевые слова:** система управления, дугогасящий реактор, вейвлет-анализ, алгоритм Берга.

В настоящее время при эксплуатации дугогасящих реакторов возникают трудности с автоматической подстройкой при изменении структуры распределительной сети. Данные трудности обусловлены сложностью определения значения емкостного тока замыкания на землю.

Существуют различные методы определения емкостного тока замыкания на землю [1]. Использование регулируемых дугогасящих реакторов и позволяет уменьшить вероятность образования дуги при замыканиях на землю и перехода однофазного замыкания в более тяжелый аварийный режим.

Широкое применение получили методы экстремальной настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю путем регулирования индуктивности дугогасящего реактора, при которых достигают максимума естественного или искусственного смещения напряжения нейтрали в нормальном режиме сети, либо используют фазовые характеристики сети выделяя опорные напряжения и сводя к нулю угол между выбранными напряжениями [2]. Первые обладают недостаточной чувствительностью, а вторые, несмотря на усложнения введе-

нием модуляции, остаются зависимыми от смещения нейтрали и добротности контура сети. Также известен способ, основанный на том, что в контур нулевой последовательности сети вводят опорный ток непромышленной частоты, измеряют полный ток контура и напряжение смещения нейтрали, выделяют соответствующие составляющие тока и напряжения и определяют емкостное и индуктивное сопротивление контура, соотношение которых используют для оценки текущей расстройки контура и формирования соответствующего регулирующего воздействия на изменение индуктивности дугогасящего реактора. В отличие от экстремальных, этот способ мало зависит от естественного смещения нейтрали и обладает расширенным диапазоном настройки. Для реализации данного способа требуется сложное вспомогательное электрооборудование в виде генератора переменной частоты повышенной мощности. Этот недостаток ограничивает область применения способа [3].

Для устранения представленных выше недостатков и для повышения точности настройки дугогасящего реактора был разработан метод, основанный

на использовании переходной характеристики контура нулевой последовательности распределительной сети, несущей полную информацию о собственной частоте и параметрах контура. Для получения этой характеристики достаточно кратковременного воздействия на контур нулевой последовательности сети в виде импульса опорного тока, вводимого в контуре нулевой последовательности сети через сигнальную обмотку дугогасящего реактора. Для выделения реакции контура в виде свободной составляющей переходного процесса достаточно одного контрольного сигнала, например, осциллограммы напряжения, снимаемой с трансформатора напряжения секции или с той же сигнальной обмотки дугогасящего реактора. Свободная составляющая определяется после дискретного вейвлет-преобразования, что позволяет исключить из сигнала напряжения контура нулевой последовательности высокочастотные помехи, неустановившиеся переходные процессы и искажения. После вейвлет-преобразования сигнала напряжения в дальнейшей работе алгоритма участвуют аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты размерностью на порядок меньше, чем размерность исследуемого сигнала напряжения, что значительно сокращает объем памяти для хранения информации.

Для определения частоты свободной составляющей контура нулевой последовательности необходимо использовать непараметрические методы для дискретных сигналов. Определение собственной частоты контура нулевой последовательности позволяет оценить степень расстройки дугогасящего реактора и при расхождении с промышленной частотой формируется регулирующее воздействие на изменение индуктивности реактора.

Рассмотрим точность определения собственной частоты при использовании различных непараметрических методов и произведем оценку их влияния на уровень расстройки дугогасящего реактора. Одним из таких непараметрических методов является метод Уэлша.

**Метод Уэлша** — усовершенствованный периодограммный анализ (еще его называют методом усреднения модифицированных периодограмм).

[4]. Этот анализ заключается в усреднении (уменьшении) спектральной плотности мощности по ряду перекрывающихся сегментов.

Перекрытие сегментов происходит для увеличения их числа. Само же перекрытие осуществляется за счет повышения помехоустойчивости алгоритма, вследствие этого происходит уменьшение способности спектрального разрешения по частоте, так как «основной» спектр вносит изменение в результирующий спектр. Результатом метода Уэлша является асимптотически несмещенная оценка спектральной плотности мощности. Оценка спектральной плотности мощности по методу Уэлша представлена на рис. 1.

Алгоритм использования метода Уэлша.

1. Производится 50 %-ное перекрытие фрагментов вектора отсчета сигнала.
2. Абсолютно каждый фрагмент умножается на использованную весовую функцию.
3. Только для взвешенных фрагментов производится вычисление модифицированной периодограммы.
4. Завершением является усреднение периодограмм всех фрагментов.

Метод Уэлша является наиболее популярным, востребованным периодограммным методом спектрального анализа.

**Метод Берга.** В методе Берга при проведении анализа коротких сигналов прослеживается высокая разрешающая способность. Другое название этого метода — алгоритм максимальной энтропии. Он очень хорошо и точно оценивает результаты. Берг в своем методе использует алгоритм Левинсона [5].

Кривая спектральной оценки по методу Берга представлена на рис. 2.

В системе MATLAB алгоритм Берга представлен с помощью двух функций: ARBURG и PBURG. С помощью функции ARBURG можно реализовать вычисление оценок параметров AP-модели. Входными переменными в этом случае является последовательность  $x(n)$  и порядок AP-фильтра  $p$ .

Функция ARBURG имеет возможность возвращать:

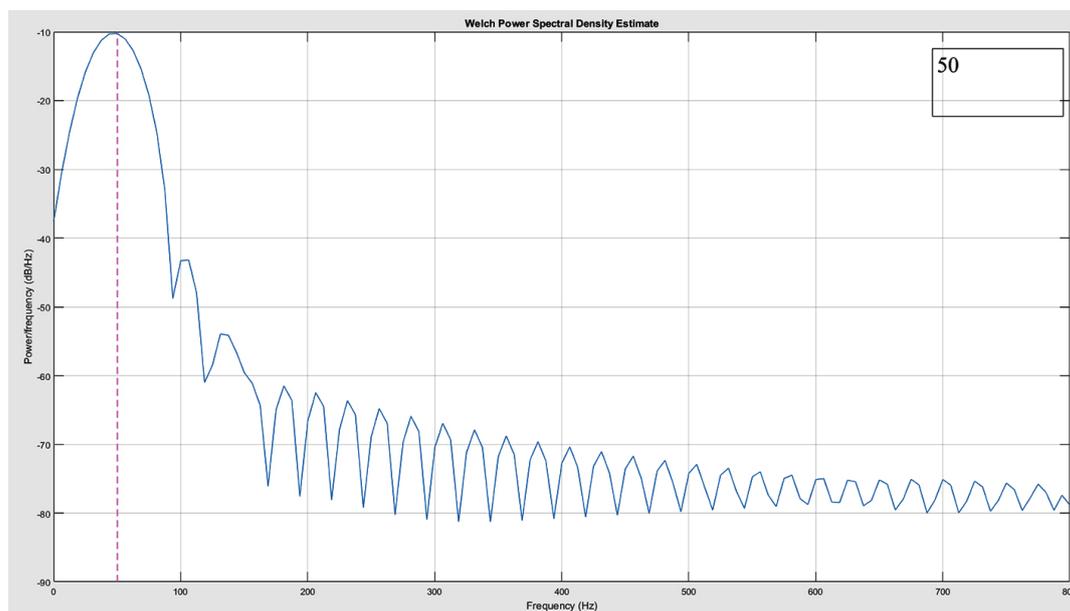


Рис. 1. Исследованный фрагмент сигнала по методу Уэлша

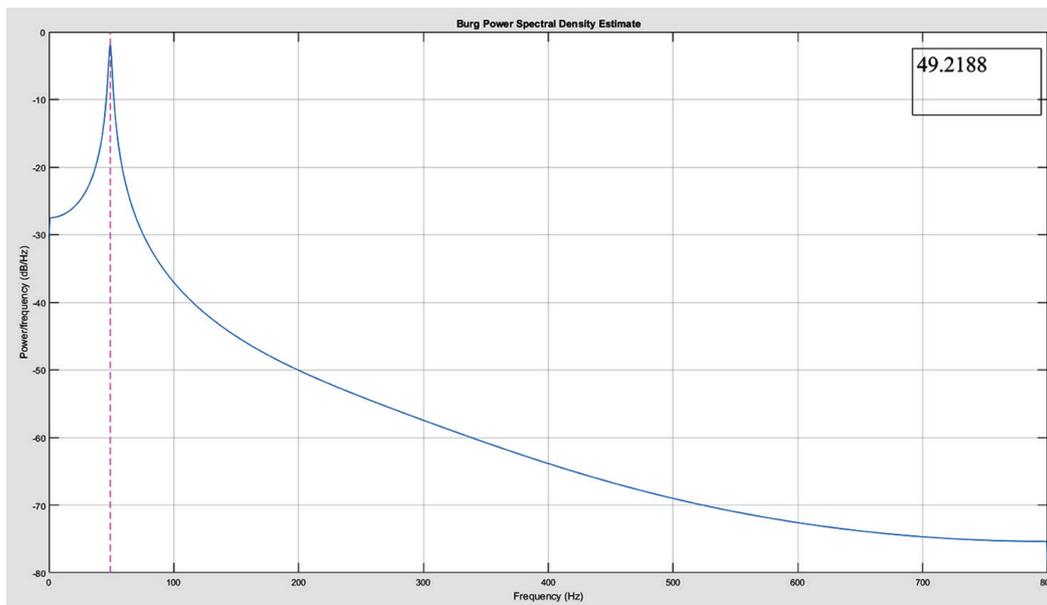


Рис. 2. Исследованный фрагмент сигнала по методу Берга

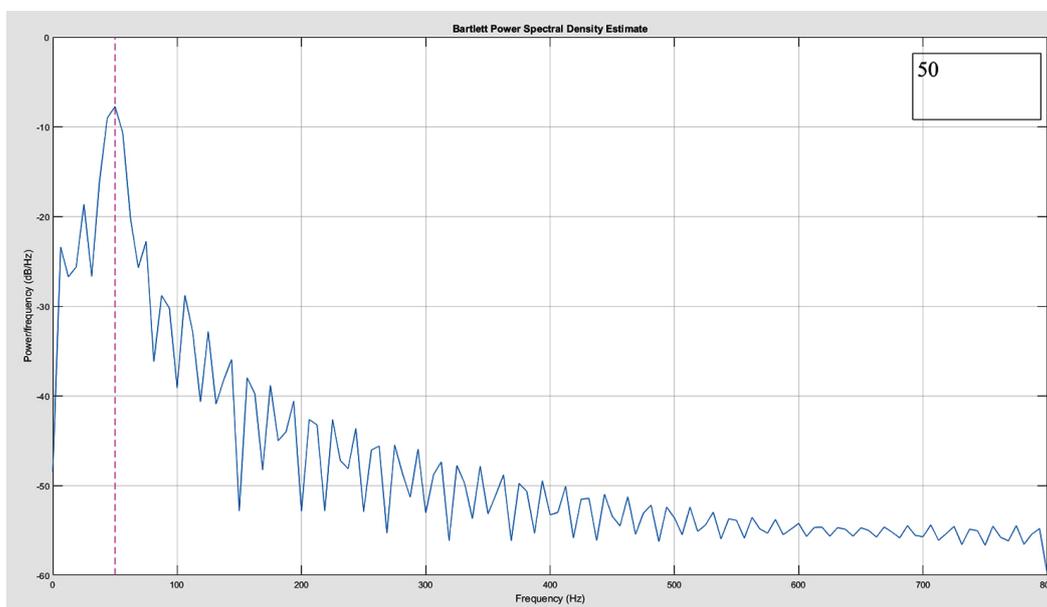


Рис. 3. Исследованный фрагмент сигнала по методу Барлетта

— вектор оценок коэффициентов АР-модели  $\tilde{\mathbf{a}} = [\tilde{a}_0 \tilde{a}_1 \dots \tilde{a}_p]$ ;

— вектор оценок коэффициентов  $\tilde{\mathbf{a}}$  и оценки дисперсий, возбуждающих белый шум  $\tilde{\sigma}_{w,p}^2$ .

— вектор оценки коэффициентов  $\tilde{\mathbf{a}}$ , оценка дисперсии  $\tilde{\sigma}_{w,p}^2$  и вектора оценки коэффициента отражения  $\tilde{\mathbf{k}} = [\tilde{k}_1 \tilde{k}_2 \dots \tilde{k}_p]$ .

А с помощью функции PBURG можно вычислить СПМ последовательность  $x(n)$ , пользуясь методом Берга [1]. В этом случае для начала находятся оценки параметров АР-модели заданного порядка  $p$ , что обеспечивает минимальную вероятность ошибки прямого и обратного предсказания  $\tilde{\sigma}_{j,b,p}^2$ .

**Метод Барлетта** (усреднение периодограмм). В отличие от периодограммы или модифицированной периодограммы метод Барлетта способен дать самостоятельную оценку энергетическому спектру. Данный метод основывается на свойствах асимпто-

тической несмещенности [6]. Ансамбль такой периодограммы до усреднения результата представлен на рис. 3. Алгоритм разложения периодограммы по методу Барлетта:

```
function Pxm = bart (x, nsect)
%
L = floor (length (x)/nsect);
P = 0;
n1 = 1;
for i = 1: nsect
P = Px + periodogram (x(n1:n1+L-1)) /nsect;
n1 = n1 + L;
end.
```

**Метод Блекмана–Тьюки.** Результат ранее рассмотренных методов моделирования периодограмм Барлетта и Уэлша достигается путем снижения (уменьшения) дисперсии периодограмм [7]. Методом Блекмана–Тьюки называется такое явление, при котором происходит сглаживание периодо-

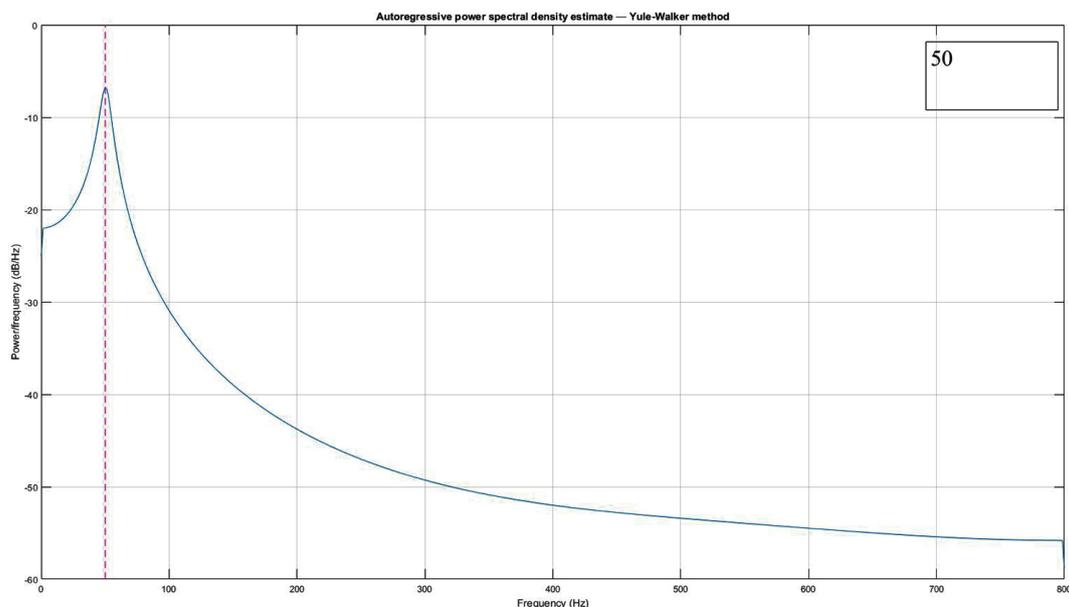


Рис. 4. Исследованный фрагмент сигнала по методу Юла–Уокера

граммы в частотной области; это улучшает качество оценки спектральной плотности мощности.

Спектр по методу Блекмана – Тьюки можно оценить с участием программного пакета MATLAB:

```
function Pxm = per_smooth (x, win, M, n1, n2)
%
x = x (:);
if nargin = 3;
n1 = 1; n2 = length(x);
end;
R = covar + periodogram (x(n1:n1),M);
r = fliplr [R(1,2, :M), R (1,1) R(1,2, :M)];
M = 2*M - 1;
w = ones (M,1);
if (win = 2) w = hamming (N);
elseif (win = 3) w = hanning (M);
elseif (win = 4) w = bartlett (M);
elseif (win = 5) w = blackman (M);
end;
r = r.*w;
Px = abs (fft (r, 1024));
Px(1) = Px(2).
```

**Метод Юла–Уокера.** Самым простым и доступным подходом в достижении результата авторегрессионной спектральной оценки на сегодняшний день приходится метод (алгоритм) Юла – Уокера. Данный метод (алгоритм), вычисление оценки основано на отсчетах данных автокорреляционной последовательности [8].

На рис. 4 показана спектральная оценка для комплексной последовательности по вышеизложенному методу [9].

В ходе проведенного анализа результатов моделирования работы алгоритма автоматической подстройки дугогасящего реактора с различными методами спектрального анализа было получено следующее:

- в качестве наиболее точного метода спектрального анализа для данного алгоритма был выбран метод Берга (метод максимальной энтропии);
- проанализирована зависимость точности оценки степени расстройки от точности расчета частоты свободной составляющей напряжения контура нулевой последовательности [10];
- неточность определения частоты свободной составляющей напряжения контура нулевой последовательности на 1 Гц дает погрешность в определении степени расстройки 4 %.

#### Библиографический список

1. Сирота И. М., Кисленко С. Н., Михайлов А. М. Режимы нейтрали электрических сетей: моногр. Киев: Наукова думка, 1985. 264 с.
2. Черников А. А. Компенсация емкостных токов в сетях с заземленной нейтралью. М.: Энергия, 1974. С. 83–84.
3. Гирия В. И., Петров О. А. Классификация систем автоматического регулирования настройки дугогасящих реакторов // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: темат. сб. науч. тр. / Челябинский политехн. ин-т им. Ленинского комсомола. 1977. № 196. С. 189–193.
4. Петров О. Точность систем автоматической настройки компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю в электрических сетях // Электрические станции. 1939. С. 92–96.
5. Druml G., Seiferd O. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Новый метод определения параметров сети // Новости Электротехники. 2007. № 2 (44). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/44/07.php> (дата обращения: 12.12.2017).
6. Козлов В., Ильин В. Дугогасящие реакторы в сетях 6–35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока с использованием частоты свободных колебаний контура нулевой последовательности сети. 2007. URL: [http://ipkrza.ru/sites/default/files/files/v.n.\\_kozlov\\_v.f.\\_il.in.\\_dugogasyashchie\\_reaktory\\_v\\_setyah\\_6-35\\_kv.pdf](http://ipkrza.ru/sites/default/files/files/v.n._kozlov_v.f._il.in._dugogasyashchie_reaktory_v_setyah_6-35_kv.pdf) (дата обращения: 23.01.2018).
7. Кричко В. А., Миронов И. А. Особенности применения дугогасящих реакторов // Новости электротехники. 2007. № 1 (43). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/07.php> (дата обращения: 10.02. 2018).
8. Dolinger S. Y., Lyutarevich A. G., Osipov D. S. Basic approaches to the implementation of Petersen Coil control system // Control and communications (SIBCON), International Siberian conference, 21–23 May 2015. Omsk, 2015. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147041.
9. Козлов В., Ильин В. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Реализация метода автоматического управления // Новости Электротехники. 2008. № 2 (50). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/50/12.php> (дата обращения: 18.01. 2018).

10. Dolinger S. Y., Lyutarevich A. G., Osipov D. S., Plankov A. A. Basic approaches to the implementation of petersen coil control system using wavelet denoising // ELEKTRO 2016. 11th International conference: conference proceeding. Omsk, 2016. P. 278 – 283. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512081.

**ДУБКОВА Анастасия Дмитриевна**, магистрант гр. ЭЭм-171 факультета элитного образования и магистратуры.

**ДОЛИНГЕР Станислав Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 1922-1321

AuthorID (РИНЦ): 642639

**ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заместитель заведующего

этого кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 2220-3520

AuthorID (РИНЦ): 175832

ORCID: 0000-0002-0830-408X

AuthorID (SCOPUS): 57188873609

ResearcherID: B-1019-2016

Адрес для переписки: Werbenka@mail.ru

#### Для цитирования

Дубкова А. Д., Долингер С. Ю., Осипов Д. С. Методы спектрального анализа в системе управления дугогасящего реактора // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 43–47. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-43-47.

Статья поступила в редакцию 21.02.2018 г.

© А. Д. Дубкова, С. Ю. Долингер, Д. С. Осипов

УДК 621.31

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-47-51

**В. А. КОПЫРИН**

Тюменский  
индустриальный университет,  
г. Тюмень

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОГРУЖНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ВЫСОКОДЕБИТНЫХ СКВАЖИН

Целью статьи является обсуждение технико-экономических вопросов целесообразности внедрения внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности на нефтяных месторождениях с действующими высокодебитными скважинами. Приведены фактические и расчетные параметры энергопотребления рассматриваемых установок электроцентробежных насосов до и после компенсации реактивной мощности внутри скважины. Установлено, что положительный энергетический эффект от внедрения внутрискважинных компенсаторов варьируется от 3,2 до 8,2 % за счет уменьшения потерь электроэнергии в электротехническом комплексе установок.

**Ключевые слова:** внутрискважинный компенсатор реактивной мощности, нефтедобывающая скважина, высокодебитные скважины, установка электроцентробежных насосов, энергия.

**Введение.** Известно, что с увеличением электрического тока увеличиваются тепловые потери в токопроводящих элементах электроустановок. В электротехническом комплексе (ЭТК) установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) для добычи нефти распределение потерь электроэнергии выглядит следующим образом: питающий трансформатор 2–5 %; станция управления 3–7 %; основной кабель и кабельный удлинитель 4–15 %; погружной асинхронный электродвигатель 10–20 % [1, 2].

В настоящее время повышение эффективности использования электроэнергии и уменьшение доли потерь от суммарного энергопотребления, при добыче нефти УЭЦН, достигаются увеличением коэффициента полезного действия электроцентробежного насоса (ЭЦН) [3, 4], снижением гидравлических потерь путем использования насосно-компрессорных

труб (НКТ) максимально возможного диаметра [5], увеличением сечения жил питающего кабеля [6, 7], длина которых может достигать 3500 м [8–10], применением погружных электродвигателей (ПЭД) с повышенным напряжением [6, 11].

Увеличение диаметра (например, с 73 мм до 89 мм) насосно-компрессорных труб позволяет снизить гидравлические потери и тем самым мощность электроцентробежного насоса. Тем не менее данный способ ввиду высокого риска повреждения питающего кабеля, уменьшения затрубного пространства большинством нефтедобывающих компаний не применяется.

Увеличение сечения токопроводящих жил питающих кабелей с целью снижения тепловых потерь является одной из простых и часто применяемых на практике технологий.