

## Электротехника

### ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*А.М. Абакумов, Д.Г. Рандин, В.В. Бочков*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

**Аннотация.** *Исследуются характеристики и эффективность замкнутой по виброускорению защищаемого объекта системы виброзащиты с исполнительным электромеханическим элементом в виде линейного двигателя постоянного тока (ЛДПТ). На основании представленной расчетной модели с учетом допущений получены математические модели системы виброзащиты в виде передаточных функций по каналу управления и возмущению. Разработана структура активной системы виброзащиты, включающая ЛДПТ, управляемый преобразователь, датчик ускорений защищаемого объекта и регулятор. С учетом разработанных математических моделей и разработанной структуры активной системы виброзащиты проведено изучение характеристик в программе Matlab. Полученные результаты исследования позволили оценить эффективность системы виброзащиты в замкнутом и разомкнутом состоянии. С учетом требований к динамическим характеристикам замкнутой системы синтезирован регулятор. Сформулированы рекомендации по использованию активной системы виброзащиты.*

**Ключевые слова:** *одномассовая расчетная модель, линейный двигатель постоянного тока, имитационное моделирование, эффективность системы виброзащиты, динамические характеристики системы виброзащиты.*

#### 1. Актуальность применения активной виброзащиты

В настоящий момент достижения науки определяют новые технологии, применяемые в технике. На смену классическим техническим решениям приходят решения на основе материалов с новыми свойствами. В частности, в традиционные системы амортизации начинают внедрять демпферы с рабочим телом в виде неньютоновской жидкости – магнитореологической. Системы амортизации с такими исполнительными устройствами позволяют расширить функционал и оптимально сочетать противоречивые требования. Например, в автомобильном транспорте [1] удастся добиться оптимального соотношения между управляемостью и плавностью хода. Системы амортизации (виброзащиты) с магнитореологическим демпфером колебаний также нашли применение в виброзащите зданий и сооружений [2]; элементов бытовой техники (барабаны стиральных машин) [3]; кресел рабочего места оператора различных систем [4] и т. п.

Известно, что системы виброзащиты с одним только демпфирующим эле-

---

*Александр Михайлович Абакумов (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».*

*Дмитрий Геннадьевич Рандин (к.т.н.), доцент.*

*Василий Викторович Бочков, магистрант.*

ментом имеют недостаток, заключающийся в ухудшении зарезонансных свойств виброзащитной системы, так как демпфер эффективно гасит только резонансные колебания. Напротив, системы виброзащиты только с элементом жесткости эффективно гасят зарезонансные колебания и малоэффективны на резонансных частотах. Поэтому достаточно часто используют схему виброзащиты с совместной параллельной установкой элемента гидравлического сопротивления (демпера) и элемента упругости – схему Кельвина [5]. Таким образом, совместное применение управляемых элементов вязкого сопротивления и жесткости позволяет эффективно управлять виброзащитными свойствами системы при различных вариациях параметров колебательной системы: амплитуды и частоты возмущения, массы защищаемого объекта и т. п.

## **2. Изученность вопроса**

К настоящему времени вопросы эффективности активной системы виброзащиты с управляемыми электромеханическими устройствами изучены не в полной мере. Практически отсутствуют публикации по исследованию эффективности систем виброзащиты с управляемыми элементами демпфирования и жесткости.

Среди множества исследований в этой области частично указанные вопросы изучены, например, в работе [6], где рассматривается электромеханическая виброзащита для сидения транспортного средства, подверженного одновременно вращению и вертикальным ускорениям. Алгоритм управления электромеханическим устройством построен на принципах  $H-\infty$  оптимизации. Доказана теоретически и экспериментально эффективность снижения среднеквадратичного значения виброускорений защищаемого объекта.

В работе [7] исследуется активная система виброзащиты прецизионного оптико-механического комплекса с несущим элементом жесткости в виде пневмобаллона и управляемым электромагнитным приводом. Для принятой структуры системы виброзащиты по предлагаемой методике проведен структурно-параметрический синтез и синтезирован оптимальный регулятор, учитывающий ограничения на имеющиеся ресурсы управления и колебания объекта виброзащиты. Дополнительно синтезирован регулятор на основе нейронной сети для условий кинематического возмущающего воздействия со стороны фундамента со случайными характеристиками. Доказано, что использование регулятора с нейронной сетью обеспечивает при вариации параметров возмущения в сравнении с оптимальным регулятором в 1,5...2 раза более низкие значения дисперсии колебаний защищаемого объекта.

Интересным техническим решением является применение пространственных механизмов параллельной структуры, позволяющих гасить пространственные колебания. В работе [8] исследуется система активной виброзащиты с электромеханическим приводом типа «винт – гайка». Разработана структура замкнутой системы с указанным исполнительным механизмом виброзащиты и проведен структурно-параметрический синтез регуляторов для детерминированного воздействия и воздействия со случайными характеристиками. Проведено сравнение амплитудных характеристик системы в случае детерминированного возмущения и спектральной плотности мощности на выходе системы виброзащиты для возмущения со случайными характеристиками. Обоснована эффективность синтезированных оптимального регулятора, регулятора для детерминированного возмущения и регулятора, обеспечивающего сверхустойчивость системы. Автором

доказано, что несомненным преимуществом обладает регулятор, обеспечивающий сверхустойчивость системы. Удовлетворительные результаты дает использование оптимального регулятора, который эффективен в подавлении возмущений сложного вида. Худшие результаты дает использование регулятора для детерминированного возмущения, но тем не менее качество виброзащиты удовлетворяет заданным требованиям, а также этот тип регулятора обеспечивает самый широкий частотный диапазон подавления возмущений.

Некоторые исследователи предлагают расширить функциональные возможности активной виброзащиты за счет дополнительно выполняемых альтернативных функций. В частности, в работе [9] исследуется возможность преобразования механической энергии колебаний с помощью активной системы виброзащиты в электрическую, ее запаса и резервного использования. Также в статье рассматривается возможность отслеживания и регистрации микроколебаний в сейсмически активных районах датчиками активной системы виброзащиты.

Применительно к транспортным средствам линейные электрические машины активной системы виброзащиты предлагается [10] использовать в качестве дополнительного источника электрической энергии. Кроме того, поскольку электрическая машина совершает возвратно-поступательные движения, предлагается возложить на нее функцию привода компрессорной установки. В качестве недостатков этого технического решения можно указать увеличенные в сравнении со штатными виброизоляторами весогабаритные показатели.

Тем не менее наибольшую популярность системы виброзащиты с управляемыми элементами жесткости и вязкого сопротивления нашли в автомобилестроении [11], так как позволяют оптимально сочетать противоречивые требования управляемости и комфорта. Наиболее часто в управляемых подвесках используются алгоритмы, построенные на принципах нейронных сетей [12], оптимального [13] и адаптивного [14] управления, нечеткой логике [15].

Таким образом, как показывает обзор публикаций в исследуемой области, вопросы изучения эффективности активной системы виброзащиты с электромеханическими исполнительными элементами остаются не до конца решенными. Среди множества вопросов этой области можно выделить: эффективность активной системы виброзащиты с исполнительным электромеханическими элементами и различными алгоритмами управления; эффективность активных систем виброзащиты с регуляторами, синтезированными для детерминированного возмущения в условиях действия возмущения со случайными характеристиками, и наоборот.

В настоящей статье рассмотрены вопросы исследования эффективности активной системы виброзащиты с ЛДПТ в условиях детерминированных возмущений.

### **3. Математические модели систем виброзащиты**

В качестве основной расчетной схемы принята одномассовая колебательная система (рис. 1). Такая расчетная схема моделирует, в частности, реальную конструкцию подвески автомобиля при допущении о том, что центр тяжести автомобиля располагается посередине колесной базы. В этом случае колебания в передней подвеске автомобиля не зависят от колебаний в задней подвеске [16].

На расчетной схеме пассивной системы виброзащиты обозначено:  $m$  – виброзащищаемая масса;  $Z_0$  – возмущающее воздействие в виде перемещения

основания;  $C$  – жесткость упругого элемента;  $\beta$  – коэффициент гидравлического сопротивления демпфирующего элемента;  $Z$  – перемещение массы  $m$ .

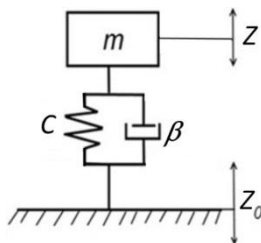


Рис. 1. Расчетная схема одномассовой колебательной системы

В [17, 18] получено дифференциальное уравнение, описывающее движение расчетной колебательной системы (здесь и далее рассматриваются уравнения для «малых» отклонений переменных):

$$m \frac{d^2 Z(t)}{dt^2} + \beta \frac{d[Z_0(t) - Z(t)]}{dt} + C[Z(t) - Z_0(t)] = 0. \quad (1)$$

В операторной форме уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$mp^2 Z(p) + \beta p [Z_0(p) - Z(p)] + C[Z(p) - Z_0(p)] = 0. \quad (2)$$

Далее перейдем от перемещений  $Z$  к ускорениям  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon(t) = \frac{d^2 Z(t)}{dt^2}, \varepsilon(p) = p^2 Z(p); \varepsilon_0(t) = \frac{d^2 Z_0(t)}{dt^2}, \varepsilon_0(p) = p^2 Z_0(p).$$

Преобразовав уравнение (2) с учетом введенных обозначений, получим:

$$m\varepsilon(p) + \frac{\beta}{p} [\varepsilon_0(p) - \varepsilon(p)] + \frac{C}{p^2} [\varepsilon_0(p) - \varepsilon(p)] = 0.$$

Приведенному операторному уравнению соответствует структурная схема, показанная на рис. 2. На основании приведенной структуры получена [19] передаточная функция (ПФ) пассивной системы виброзащиты для выходной переменной в виде ускорения защищаемого объекта  $\varepsilon(p)$  и входной  $\varepsilon_0$  – ускорение координаты основания:

$$W_p^{\varepsilon\varepsilon_0}(p) = \frac{\varepsilon(p)}{\varepsilon_0(p)} = \frac{\frac{\beta}{C}p + 1}{\frac{m}{C}p^2 + \frac{\beta}{C}p + 1}.$$

Обозначив

$$\sqrt{\frac{m}{C}} = T_1; \frac{\beta}{C} = T_2,$$

последнее выражение можно записать в виде

$$W_p^{\varepsilon\varepsilon_0}(p) = \frac{\varepsilon(p)}{\varepsilon_0(p)} = \frac{T_2 p + 1}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (3)$$

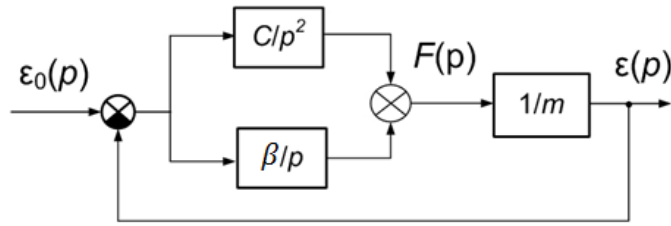


Рис. 2. Структурная схема системы виброзащиты

Дополним полученную математическую модель уравнениями движения ЛДПТ, управляемого напряжением  $U$  на якоре [20]:

$$U(t) = E(t) + I(t)R + L \frac{dI(t)}{dt}; \quad (4)$$

$$E(t) = k\Phi \int_0^t [\varepsilon_0(t) - \varepsilon(t)] dt, \quad (5)$$

где  $I$  – ток якоря;  
 $E$  – наведенная в якоре ЭДС;  
 $L$  – индуктивность цепи якоря;  
 $R$  – сопротивление якорной цепи двигателя;  
 $k\Phi$  – коэффициент передачи двигателя.

Механическое усилие, создаваемое ЛДПТ при постоянном магнитном потоке, определяется током якоря:

$$F_M = k\Phi I(t). \quad (6)$$

Уравнения (4) – (6) в операторной форме имеют вид

$$U(p) = E(p) + I(p)R[1 + T_E p]; \quad (7)$$

$$E(p) = k\Phi[\varepsilon_0(p) - \varepsilon(p)]/p; \quad (8)$$

$$F_M(p) = k\Phi I(p), \quad (9)$$

где  $T_E = L/R$  – электромагнитная постоянная ЛДПТ.

Уравнение (7) может быть преобразовано к виду

$$W_{M1}(p) = \frac{I(p)}{U(p) - E(p)} = \frac{1}{R(T_E p + 1)}. \quad (10)$$

Исходная структурная схема системы, дополненная звеньями, отражающими динамические свойства ЛДПТ, приведена на рис. 3.

На основании приведенной структуры получена ПФ объекта управления, устанавливающая взаимосвязь между ускорением  $\varepsilon$  и механической силой  $F_M$ , создаваемой двигателем:

$$W^{\varepsilon F}(p) = \frac{\varepsilon(p)}{F_M(p)} = \frac{p^2/c}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (11)$$

Для организации активной (замкнутой) системы виброзащиты структура дополнена цепью отрицательной обратной связи (показана пунктирной линией), включающей датчик обратной связи – датчик ускорений с коэффициентом передачи  $k_S$ , регулятором с ПФ  $W_R(p)$  и управляемым преобразователем с ПФ  $W_u(p) = k_U$ .

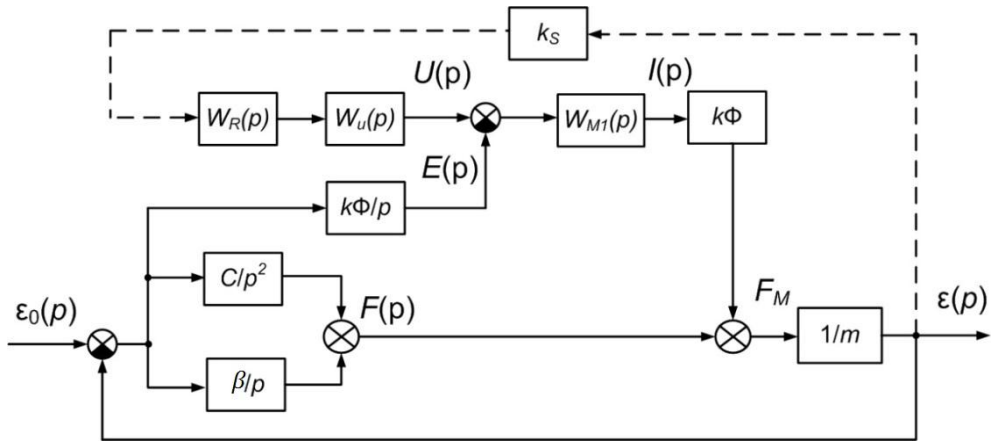


Рис. 3. Структурная схема системы виброзащиты с ЛДПТ

#### 4. Исследование динамических характеристик системы активной виброзащиты

Внутренней обратной связью по ЭДС двигателя при синтезе систем электропривода обычно пренебрегают. Без учета связи по ЭДС двигателя ПФ контура отрицательной обратной связи активной системы виброзащиты в разомкнутом состоянии имеет вид

$$W_{op}(p) = W_R(p)W^{\varepsilon F}(p) \frac{k_{op}}{(T_E p + 1)}, \quad (12)$$

где коэффициент передачи

$$k_{op} = k_S k_U k\Phi / R. \quad (13)$$

На основании полученного математического описания разработана компьютерная модель системы активной виброзащиты и исследованы ее характеристики. При моделировании приняты следующие характерные [21] численные значения параметров:

$$T_1 = 0,073\text{с}, T_2 = 0,03\text{с}, C = 15\text{кН/м}; k_{op} = 10.$$

Синтез регулятора системы проведен с использованием частотной плоскости. Логарифмические амплитудные (ЛАХ) и фазовые (ЛФХ) частотные характеристики, соответствующие ПФ по выражению (12), приведены на рис. 4.

До введения регулятора ЛАХ рассматриваемого контура имеет вид  $L_{op1}(\omega)$ , ЛФХ –  $\varphi_{op1}(\omega)$ . В области существенных частот  $L_{op1}(\omega)$  располагается ниже оси частот. Известно [22], что для эффективного подавления возмущающих воздействий в замкнутой системе необходимо увеличивать модуль ПФ  $W_{op}(p)$  разомкнутой системы в области существенных частот. Для решения этой задачи в системе использован пропорционально-интегральный регулятор с ПФ:

$$W_R(p) = \frac{T_{R1}p + 1}{T_{R2}p}. \quad (14)$$

Постоянная времени дифференцирующего множителя регулятора принята равной  $T_{R1} = T_1$ . Выбор постоянной времени интегрирующего преобразования регулятора  $T_{R2}$  проведен с учетом следующего: уменьшение значения  $T_{R2}$  позволяет увеличить значение ординат ЛАХ разомкнутой системы в интересующей области частот, т. е. увеличить модуль ПФ  $W_{op}(p)$ . В связи с этим значение  $T_{R2}$

должно выбираться с учетом требуемого снижения максимального значения амплитудной частотной характеристики (АЧХ) замкнутой системы относительно возмущающего воздействия до допустимых пределов. В то же время необходимо учитывать, что повышение эффективности виброзащиты требует увеличения энергетических возможностей исполнительного элемента. В рассматриваемом примере выбрано  $T_{R2} = 0,01$ с.

ЛАХ и ЛФХ регулятора на рис. 4 обозначены  $L_R(\omega)$ ,  $\varphi_R(\omega)$  соответственно. В результате введения регулятора ЛАХ и ЛФХ рассматриваемого контура принимают вид  $L_{op2}(\omega)$  и  $\varphi_{op2}(\omega)$  соответственно.

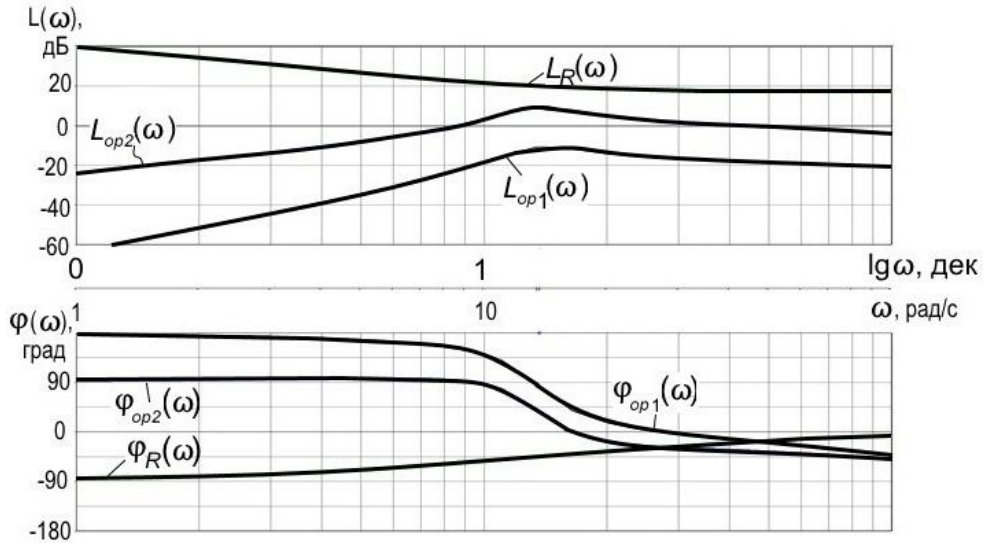


Рис. 4. ЛАХ и ЛФХ активной системы виброзащиты в разомкнутом состоянии

Оценка эффективности активной системы проведена на основе сравнения ее характеристик с характеристиками пассивной системы. На рис. 5 показаны АЧХ замкнутой активной  $A_a(\omega)$  (кривая 2) и пассивной  $A_p(\omega)$  (кривая 1) систем виброзащиты:

$$A_a(\omega) = \frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_0(\omega)}; A_p(\omega) = \frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_0(\omega)}.$$

Как следует из приведенных характеристик, в замкнутой скорректированной системе по сравнению с пассивной удастся существенно снизить максимальное значение АЧХ относительно возмущающего воздействия:  $A_{pmax} = 2,7$ ;  $A_{amax} = 1,2$ . Таким образом, максимальное значение АЧХ снижается более чем в 2 раза.

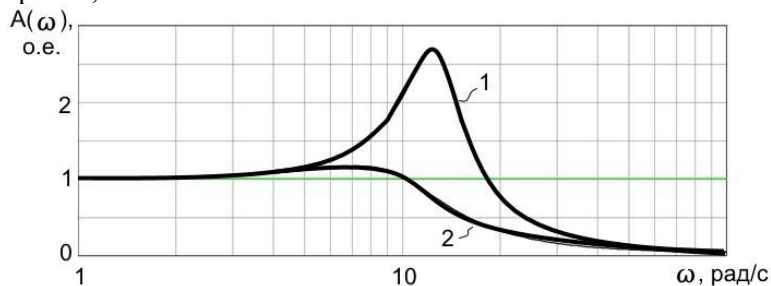


Рис. 5. АЧХ системы виброзащиты

Проведена оценка эффективности активной системы виброзащиты при действии ступенчатого возмущающего воздействия в виде перемещения основания  $Z_0$ . Графики переходных процессов изменения перемещения  $Z$  виброзащищаемой массы при таком воздействии приведены на рис. 6: кривая 1 – для активной системы; 2 – для пассивной.

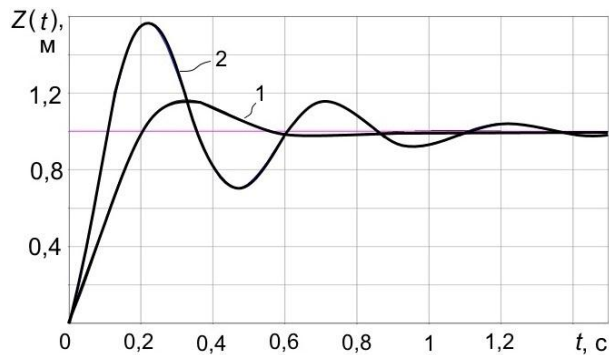


Рис. 6. Графики переходных процессов в активной (кривая 1) и пассивной (кривая 2) системах виброзащиты

Для пассивной системы виброзащиты время регулирования составляет  $t_p = 1,4$  с, перегулирования  $\sigma_p = 67$  %; для активной  $t_a = 0,5$  с;  $\sigma_a = 16$  %.

### Выводы

Рассмотренная активная система с исполнительным элементом в виде ЛДПТ позволяет существенно повысить эффективность виброзащиты. В частности, в области резонансной частоты за счет использования в замкнутой системе синтезированного регулятора удается более чем в два раза снизить амплитуду колебаний защищаемого объекта. Использование активной системы позволяет также улучшить качество переходных процессов при действии ступенчатых возмущающих воздействий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Потенберг Р.В.* Подвеска автомобиля. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
2. *Joseph H.K. Lee, Ray K.L. Su, Peter K.K. Lee, Louis C.H. Lam.* Semi-active damping device for vibration control of buildings using magnetorheological fluid // *Advances in Building Technology, Volume II*, 2002. – pp. 969–976.
3. *Cristiano Spelta.* Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine / *Cristiano Spelta, Fabio Previdi, Sergio M. Savaresi, Giuseppe Fraternali, Nicola Gaudio* // *Mechatronics* 19 (2009), Pp. 410–421.
4. *Martin Orečnа.* Application of a Magneto-rheological Damper and a Dynamic Absorber for a Suspension of a Working Machine Seat / *Martin Orečnа, Štefan Segl'aa, Rybert Huňadya, Želtnга Ferkovbb* // *Procedia Engineering* № 96 ( 2014 ). – pp. 338–344.
5. *Грибов М.М.* Регулируемые амортизаторы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1974. – 144 с.
6. *Donghong Ningab, Shuaishuai Sunc, Haiping Dub, Weihua Lic, Wenxing Lib.* Control of a multiple-DOF vehicle seat suspension with roll and vertical vibration // *Journal of Sound and Vibration* Volume 435, 24 November 2018, Pages 170–191.
7. *Абакумов А.М., Мятюв Г.Н., Винокуров А.А.* Электромеханические системы виброзащиты прецизионных объектов с использованием нейронных сетей // *Электротехника*. – 2008. – № 8. – С. 57–61.
8. *Чичварин А.В.* Динамика активной системы виброизоляции с механизмами параллельной



- структуры: дис. ... кандидата технических наук: 01.02.06 / Старый Оскол: Старооскольский филиал Московского государственного института стали и сплавов (технологический университет). – Старый Оскол, 2006. – 153 с.
9. *Yalu Pei, Yilun Liu, Lei Zuo*. Multi-resonant electromagnetic shunt in base isolation for vibration damping and energy harvesting // *Journal of Sound and Vibration* Volume 423, 9 June 2018, Pages 1–17.
  10. Патент РФ 2079956. Линейный генератор-компрессор для транспортных средств. Гурницкий В.Н., Никитенко Г.В., Гурницкий В.В. Оpubл. 20.05.1997. Заявка: 93041340/07, 17.08.1993. Бюл. № 33, 2001.
  11. *Savaresi S.M.* Semi-active suspension control design for vehicle / *Savaresi S.M., Pussot-Vassal C., Spelta S., Sename S., Dugard L.* – 2010. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-096678-6.
  12. *Pang Huia, Liu Fana, Xu Zerenb*. Variable universe fuzzy control for vehicle semi-active suspension system with MR damper combining fuzzy neural network and particle swarm optimization // *Neuro-computing*, Volume 306, 6 September 2018, Pages 130–140.
  13. *Panos Brezasa, Malcolm C. Smithal, Will Houlthb*. A clipped-optimal control algorithm for semi-active vehicle suspensions: Theory and experimental evaluation // *Automatica* Volume 53, March 2015, Pages 188–194.
  14. *Huihui Panab, Weichao Suna, Xingjian Jingbc, Huijun Gaoa, Jianyong Yaod*. Adaptive tracking control for active suspension systems with non-ideal actuators // *Journal of Sound and Vibration* Volume 399, 7 July 2017, Pages 2–20.
  15. *Banna Kasemi*. Fuzzy-PID Controller for Semi-Active Vibration Control Using Magnetorheological Fluid Damper / *Banna Kasemi, Asan G. A. Muthalif, M. Mahbubur Rashid, Sharmila Fathima* // *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012)*, *Procedia Engineering* 41 (2012). – pp. 1221–1227.
  16. *Дербаремдикер А.Д.* Амортизаторы транспортных машин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 200 с.: ил.
  17. *Рандин Д.Г.* Исследование активной системы виброзащиты с управляемым демпфером // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2012. – № 4. – С. 177–185.
  18. *Рандин Д.Г.* Исследование динамических характеристик управляемого демпфера // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2013. Вып. 2 (38). – С. 64–70.
  19. *Абакумов А.М., Чеботков Э.Г., Рандин Д.Г.* Исследование активной подвески автомобиля с магнитореологическим амортизатором // *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. – 2015. – Т. 1. – № 2 (24). – С. 5–10.
  20. *Абакумов А.М., Хатилин В.М., Волков А.П.* Динамика линейного двигателя постоянного тока // *Вестник УрФУ. Сер. Экономика и управление*. – 2003. – № 5. – С. 84.
  21. *Рандин Д.Г.* Исследование динамических характеристик управляемого демпфера // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2013. – Вып. 2. – С. 64.
  22. *Пупков К.А.* Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 т. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления / Под ред. *К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова*. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.

*Статья поступила в редакцию 1 июня 2018 г.*

# INVESTIGATION OF AN ACTIVE VIBRATION PROTECTION SYSTEM BASED ON A LINEAR DIRECT CURRENT MOTOR

*A.M. Abakumov, D.G. Randin, V.V. Bochkov*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *In the paper the characteristics system and efficiency of a closed-loop vibration protection with an executive electromechanical element in the form of a linear DC motor (LDCM) are considered. Based on the presented calculation model, with necessary assumptions, mathematical models of the vibration protection system in the form of transfer functions along the control and disturbance channel are. The structure of the active vibration protection system including LDCM, controlled converter, accelerometer sensor of the protected object and regulator is developed. Taking into account the developed mathematical models and the developed structure of the active vibration protection system, the analysis of the system's characteristics by simulation has been carried out. The obtained results of the analysis allowed to estimate the effectiveness of the vibration protection system in a closed and open state. Taking into account the requirements for the dynamic characteristics of a closed-loop system, a regulator is synthesized. Recommendations on the use of an active vibration protection system are formulated.*

**Keywords:** *single-mass calculation model, linear DC motor, imitation simulation, vibro-protection system efficiency, dynamic characteristics of the vibration protection system.*

## REFERENCES

1. *Rotenberg R.V.* Vehicle suspension. – M.: Mashinostroenie (in Russian), 1972.
2. *Joseph H.K. Lee, Ray K.L. Su, Peter K.K. Lee, Louis C.H. Lam.* Semi-active damping device for vibration control of buildings using magnetorheological fluid // *Advances in Building Technology*, Volume II, 2002. – pp. 969–976.
3. *Cristiano Spelta.* Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine / *Cristiano Spelta, Fabio Previdi, Sergio M. Savaresi, Giuseppe Fraternali, Nicola Gaudio* // *Mechatronics* 19 (2009), Pp. 410–421.
4. *Martin Orečnа.* Application of a Magneto-rheological Damper and a Dynamic Absorber for a Suspension of a Working Machine Seat / *Martin Orečnа, Štefan Segl'aa, Rybert Huňadya, Želtnга Ferkovбb* // *Procedia Engineering* № 96 (2014). – pp. 338–344.
5. *Gribov M.M.* Regulated damper of radio electronic apparatus. – M.: Sovetskoe radio (in Russian), 1974. – 144 c.
6. *Donghong Ningab, Shuaishuai Sunc, Haiping Dub, Weihua Lic, Wenxing Lib.* Control of a multiple-DOF vehicle seat suspension with roll and vertical vibration // *Journal of Sound and Vibration* Volume 435, 24 November 2018, Pages 170–191.
7. *Abakumov A.M.* Neural-network-based electromechanical systems for the vibroisolation of precision equipment] / *Abakumov A.M., Myatov G.N., Vinokurov A.A.* // *Russian Electrical Engineering*. 2008. T. 79. № 8. C. 462–465.
8. *Chichvarin A.V.* Dynamics of the active vibration isolation system with mechanisms of parallel structure: PhD dissertation. Stary Oskol filial of National University of Science and Technology «MISiS», Stary Oskol, 2006.
9. *Yalu Pei, Yilun Liu, Lei Zuo.* Multi-resonant electromagnetic shunt in base isolation for vibration damping and energy harvesting // *Journal of Sound and Vibration* Volume 423, 9 June 2018, Pages 1–17.
10. *Gurnitsky V.N., Nikitenko G.V., Gurnitsky V.N.* RU Patent 2079956. Linejnyj generator-kompressor dlya transportnyh sredstv. Opubl. 20.05.1997. Zayavka: 93041340/07, 17.08.1993. Бюл. № 33, 2001.

---

*Alexander M. Abakumov, (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Dmitry G. Randin, (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Vasily V. Bochkov, Graduate Student.*

11. *Savaresi S.M.* Semi-active suspension control design for vehicle / Savaresi S.M., Pussot-Vassal C., Spelta S., Sename S., Dugard L. – 2010. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-08-096678-6.
12. *Pang Huia, Liu Fana, Xu Zerenb.* Variable universe fuzzy control for vehicle semi-active suspension system with MR damper combining fuzzy neural network and particle swarm optimization // *Neuro-computing*, Volume 306, 6 September 2018, Pages 130–140.
13. *Panos Brezasa, Malcolm C. SmithaI, Will Houltb.* A clipped-optimal control algorithm for semi-active vehicle suspensions: Theory and experimental evaluation // *Automatica* Volume 53, March 2015, Pages 188–194.
14. *Huihui Panab, Weichao Suna, Xingjian Jingbc, Huijun Gaoa, Jianyong Yaod.* Adaptive tracking control for active suspension systems with non-ideal actuators // *Journal of Sound and Vibration* Volume 399, 7 July 2017, Pages 2–20.
15. *Banna Kasemi.* Fuzzy-PID Controller for Semi-Active Vibration Control Using Magnetorheological Fluid Damper / Banna Kasemi, Asan G.A. Muthalif, M. Mahbubur Rashid, Sharmila Fathima // *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012)*, *Procedia Engineering* 41 (2012). – pp. 1221–1227.
16. *Derbaremdiker A.D.* Vehicle damper. – M.: Mashinostroenie (in Russian), 1985. – 200 pp.
17. *Randin D.G.* The research of active vibration isolation system with controlled damper // *Scientific and technical Volga region bulletin*. 2012. № 4. pp. 177-185.
18. *Randin D.G.* Research of dynamic characteristics of controlled damper // *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2013. № 2 (38). pp. 64–70.
19. *Abakumov A.M.* Research of automobile active suspension with magnetorheological damper / *A.M. Abakumov, E.G. Chebotkov, D.G. Randin* // *Izvestiya MGTU MAMI. Vehicle and energy machine. Scientific peer-reviewed journal*. – 2015. – № 2 (24). – T. 1. – C. 5–10 (In Russian)
20. *Abakumov A.M.* Dinamika linejnogo dvigatelya postoyannogo *Abakumov A.M., Khatilin V.M., Volkov A.P.* // *Bulletin of South Ural State University, Series «Economics and Management»*. 2003. № 5. pp. 84.
21. *Randin D.G.* Research of dynamic characteristics of controlled damper // *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2013. № 2. pp. 64.
22. *Pupkov K.A.* *Methods of Classic and Modern Control Theory. Volume V – «Methods of Modern Control Theory»* / edited by K.A. Pupkov, N.D. Egupov. – M.: Izdatelstvo MGTU im N.E. Bauman (In Russian), 2004. – 784 p.

УДК 621.3

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК НЕФТЕДОБЫЧИ**

***В.Г. Гольдштейн, В.С. Романов***

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vgg41@yandex.ru; romanov\_v.s@mail.ru

***Аннотация.*** Предлагается метод повышения надежности эксплуатации электропогружных установок (ЭПУ) нефтедобычи, основанный на использовании механизмов менеджмента качества, таких как диаграммы К. Исикавы и В. Парето, а также метод анализа видов и последствий потенциальных отказов – FMEA-анализ (Failure Mode and Effects Analysis). Каждый из выделенных механизмов стратегически направлен на решение определенных задач – диаграмма К. Исикавы (или диаграмма «рыбьей кости») позволяет в графической форме установить наиболее существенные причинно-следственные взаимосвязи между факторами и последствиями в исследуемой проблеме; метод FMEA позволяет произвести анализ технологических нарушений, спрогнозировать потенциально возможные отказы (дефекты), установить причины и последствия их возникновения, произвести оценку возникающих рисков и предпринять меры для устранения, профилактики и снижения ущерба от их появления; на основании FMEA-анализа выполняется построение диаграммы В. Парето, которая дает возможность установить приоритет действиям, необходимым для решения проблемы. В результате определены «узкие» места в эксплуатации ЭПУ и разработаны рекомендации по их устранению.

***Ключевые слова:*** погружное электрооборудование, погружные электродвигатели, нефтедобыча, надежность, статистика отказов, диаграмма К. Исикавы, диаграмма В. Парето, FMEA-анализ, технологические нарушения.

Анализ результатов статистического анализа производственных результатов эксплуатации ЭПУ на нефтегазодобывающих предприятиях (НГДП) говорит об острой необходимости комплексной оценки их деятельности, в которой должны быть объединены технические и экономические механизмы повышения надежности эксплуатации [1]. Теоретической основой технических методов повышения надежности функционирования ЭПУ являются статистический анализ, математическое моделирование и исследования структурно-функциональных свойств конструкций ЭПУ и конкретно погружных электродвигателей (ПЭД) [2]. Для повышения надежности технической системы (ЭПУ и ПЭД) при реализации комплексного технико-экономического подхода к решению этой задачи представляется целесообразным рассмотреть применение методов и инструментов системы менеджмента качества, таких как диаграмма Каору Исикавы (1952) [3],

---

*Валерий Геннадьевич Гольдштейн (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».*

*Владимир Сергеевич Романов, аспирант.*

известная также как диаграмма «рыбьей кости» (Fishbone Diagram), или «причинно-следственная» диаграмма (Cause and Effect Diagram); метод анализа видов и последствий потенциальных отказов, или FMEA-анализ [4] (Failure Mode and Effects Analysis); диаграмма Вильфредо Парето [5].

Диаграмма К. Исикавы – графический способ исследования и определения наиболее существенных причинно-следственных взаимосвязей между факторами и последствиями в исследуемой ситуации или проблеме. Диаграмма – одна из методик логического анализа и улучшения качества процессов в промышленности, она позволяет выявить ключевые взаимосвязи между различными факторами и более точно понять исследуемый процесс; способствует определению главных факторов, оказывающих наиболее значительное влияние на развитие рассматриваемой проблемы, а также предупреждению или устранению действия данных факторов [3].

Эта диаграмма позволяет установить причинно-следственные связи возникновения отказов ЭПУ и ПЭД. На первом этапе исследования для конкретного технического объекта (в данном случае это ЭПУ) и (или) производственного процесса с его конкретной функцией на основании опыта эксплуатации, предварительной истории и технологических нарушений с использованием статистического материала по отказам ЭПУ и ПЭД [6] определяются все возможные виды дефектов, которые возникли вследствие отказа. Результатом данного анализа служит построение диаграммы причинно-следственной связи для оценки составляющих надежности функционирования ЭПУ, представленной на рис. 1 [7].

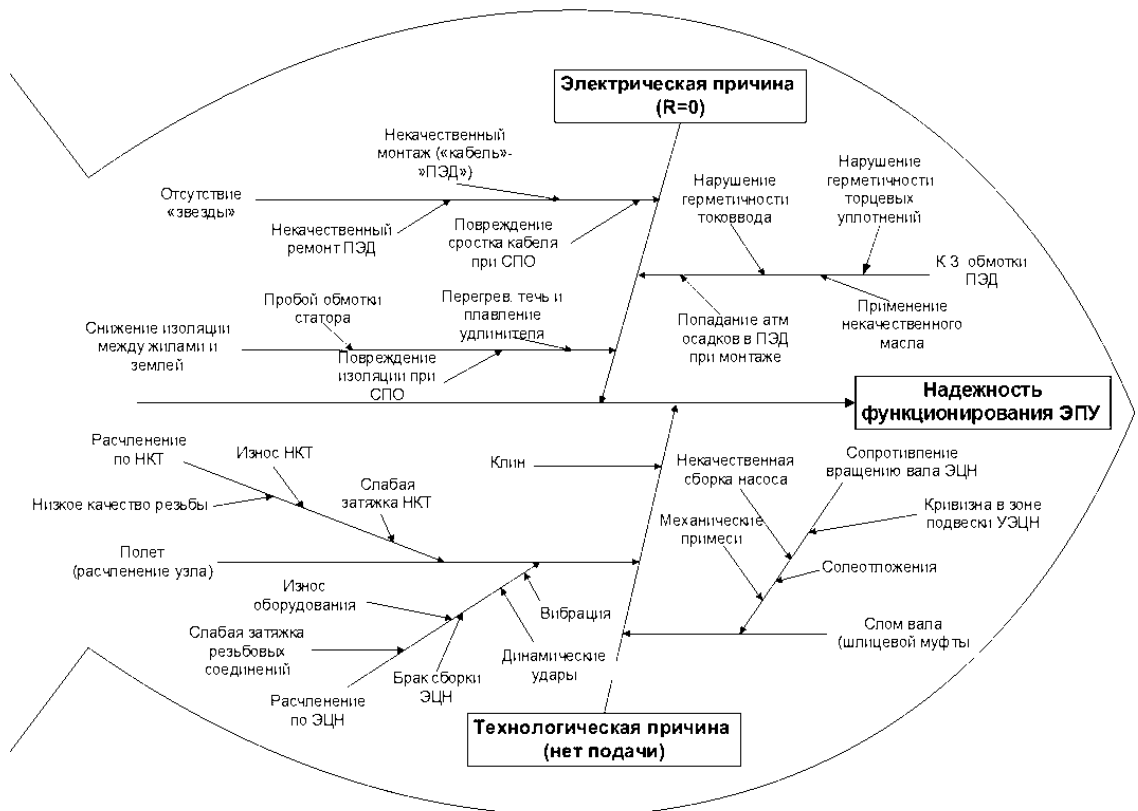


Рис. 1. Диаграмма К. Исикавы причинно-следственной связи для оценки составляющих надежности функционирования ЭПУ

На рис. 1 в графической форме устанавливается причинно-следственная связь между всевозможными отказами (дефектами, приведшими к отказам) в работе погружного оборудования и надежностью функционирования ЭПУ. Условно принято разделение причин отказов на электрические ( $R=0$ ) [8] и технологические (нет подачи) [9]. Их содержание подробно представлено ниже.

1. Электрическая причина возникновения отказа элементов электротехнического комплекса ЭПУ, как правило, связана с нарушением нормального состояния его электрической части, электромагнитной совместимости либо с низким качеством сборки и монтажа основных электромеханических и электромагнитных устройств в составе ЭПУ [8]. При рассмотрении данной категории отказов следует акцентировать внимание на следующих ее составляющих:

а) снижение качества изоляции между жилами и землей. Данный дефект может возникать по следующим причинам:

- пробой обмотки статора, который является следствием старения изоляции погружного электродвигателя, заводского брака изготовления самого ПЭД [10], перегрева двигателя (как правило, возникает по причине малого притока, срыва подачи, негерметичности нососно-компрессорных труб (НКТ), высокой температуры перекачиваемой жидкости и т. д.), повышенной вибрации, являющейся одним из немаловажных факторов отказа [11], в результате которой происходят пропуски пластовой жидкости через торцевое уплотнение с последующим пробоем изоляции самого двигателя;
- перегрев, течь и плавление удлинителя. Возникают из-за некачественной эксплуатации установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) (частые отключения защиты от турбинного вращения [10], некачественный подбор УЭЦН (недостаточный приток), частые отключения от защиты срыва подачи (ЗСП) (в насосе газ, отсутствие подачи), частые отключения от ЗП (повышенное содержание количества взвешенных частиц (КВЧ), интенсивное солеотложение, подклинивание вследствие износа рабочих органов, некачественное электроснабжение), некачественного вывода в ремонт УЭЦН (несоблюдение регламента по выводу УЭЦН, брак подбора УЭЦН) [11];
- повреждение изоляции при спускоподъемных операциях (СПО), что обусловлено нарушением скорости спуска, наличием посторонних предметов и перекрутом удлинителя кабеля [12];

б) КЗ обмотки ПЭД. Исключение возникновения подобного отказа во многом зависит от герметичности торцевых уплотнений, герметичности токоввода, качества масла, наличия или отсутствия попадания атмосферных осадков в ПЭД при монтаже [7];

в) отсутствие «звезды» (нарушение целостности цепи). Это один из самых сложных комплексных параметров надежности ЭПУ, основными вызывающими факторами которого являются: некачественный ремонт ПЭД, повреждение сроска кабеля при СПО, некачественный монтаж («кабель» – «ПЭД»), замыкание датчика на УЭЦН [1, 13].

2. Технологическая причина отказа (нет подачи), как правило, заключается в нарушении условий функционирования составных элементов УЭЦН вследствие ухудшения или изменения условий эксплуатации [11], низкого качества оборудования и его монтажа. Рассмотрим более подробно преобладающие отказы в работе по технологическим причинам:

а) закручивание или слом вала УЭЦН в результате возникновения сопротивления его вращению. Главными определяющими факторами данного отказа являются некачественная сборка насоса, кривизна в зоне подвески УЭЦН, солеотложения, механические примеси [8, 12];

б) полет (расчленение узла). При рассмотрении отказов в механической части ЭПУ расчленение узла разделяют на расчленение по НКТ и расчленение по ЭЦН [9]; в первом случае отказ возникает по причинам старения НКТ, некачественной затяжки НКТ, неудовлетворительного качества резьбы, вибрации; во втором случае – из-за брака сборки ЭЦН, старения оборудования, некачественной затяжки резьбовых соединений, динамических ударов [10];

в) заклинивание насоса – частный случай технологического отказа, возникающий из-за брака изготовления самого УЭЦН.

После проведенного анализа и установления причинно-следственной связи между отказом в работе ЭПУ и основными дефектами, приводящими к отказу, предлагается проводить мониторинг, посредством которого выявляются все недостатки эксплуатации оборудования скважины, их причины и разрабатываются процедуры в виде корректирующих действий с целью повышения надежности всей системы в целом [2]. Содержание предложенной схемы мониторинга представлено в табл. 1, 2.

Схема мониторинга, изображенная в табл. 1, 2, устанавливает взаимосвязь между явлениями возникновения отказов в работе ЭПУ, причинами их возникновения, последствиями и предложенными действиями по их исключению в процессе дальнейшей эксплуатации. В данной схеме описаны основные составляющие диаграммы причинно-следственной связи оценки надежности функционирования ЭПУ, приведенной на рис. 1, а именно: для электрической причины возникновения отказа элементов электротехнического комплекса ЭПУ – снижение изоляции между жилами и землей, КЗ обмотки ПЭД, отсутствие «звезды» (нарушение целостности цепи); для технологической причины отказа (нет подачи) – полет (расчленение узла), слом вала, клин. Остальные виды технологических нарушений являются более частными случаями либо следствием рассмотренных отказов [13] и устраняется по разработанным алгоритмам согласно табл. 1, 2. Выполненная схема мониторинга с подробным описанием причинно-следственной связи процесса возникновения технологических нарушений ЭПУ и ПЭД послужит незаменимой базой для выполнения дальнейшего исследования по методу FMEA-анализа [4].

Метод анализа видов и последствий потенциальных отказов, или FMEA, является эффективным механизмом обеспечения качества действующих и разрабатываемых сложных технических систем, применяемым для обнаружения и устранения технологических нарушений и сопряженных с ними дефектов либо снижения негативных последствий от них [14]. Его реализация возможна за счет разработки комплекса мероприятий по прогнозированию дефектов (отказов), их анализу на различных жизненных циклах системы (объекта) или отдельно взятого элемента.

Метод FMEA позволяет произвести анализ технологических нарушений на НГДП, спрогнозировать потенциально возможные отказы (дефекты), установить причины и последствия их возникновения, произвести оценку возникающих рисков, в частности по выявлению или невыявлению дефектов (скрытые дефекты), и предпринять меры для их устранения, уменьшения вероятности возникновения, профилактики и снижения ущерба от их появления [15].

**Схема мониторинга причин и следствий, связанных с отказом  
в работе ЭПУ по технологическим причинам**

Характер отклонений	Причины	Последствия	Действия
Слом вала (шлицевой муфты)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Заводской брак</li> <li>2. Скрытый дефект вала</li> <li>3. Брак комплектации</li> <li>4. Несоответствие максимально передаваемой мощности вала мощности ПЭД</li> <li>5. Слом вала при расклинивании УЭЦН (превышение допустимых нагрузок на вал)</li> <li>6. Выработка ресурса вала ввиду длительной эксплуатации</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Значительное снижение токовых нагрузок и загрузки ПЭД относительно нормальных рабочих значений</li> <li>2. Отсутствие или снижение производительности УЭЦН</li> <li>3. Недобор нефти, убытки компании</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Комплектация узлов и деталей ЭЦН согласно утвержденной технической документации</li> <li>2. Недопущение длительного воздействия критических нагрузок на УЭЦН при эксплуатации и работах по расклиниванию</li> </ol>
Клин	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Засорение рабочих органов ЭЦН</li> <li>2. Нарушение технологии эксплуатации УЭЦН</li> <li>3. Некачественное освоение скважины</li> <li>4. Работа УЭЦН в зоне недопустимого значения кривизны ствола скважины</li> <li>5. Повышенный уровень вибрации УЭЦН</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Заклинивание и выход из строя оборудования скважины, останов скважины</li> <li>2. Недобор нефти, убытки компании</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Соблюдение технологии проведения ГРП и освоения скважины после ГРП</li> <li>2. Недопущение создания высоких депрессий на ПЗП</li> <li>3. Промывка рабочих органов УЭЦН</li> <li>4. Профилактика и предупреждение солеотложений</li> </ol>
Полет (расчленение узла)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Скрытые дефекты</li> <li>2. Механические повреждения при монтаже</li> <li>3. Износ в результате выноса проппанта после ГРП</li> <li>4. Высокое содержание КВЧ</li> <li>5. Коррозия в связи с длительной эксплуатацией</li> <li>6. Нарушение технологии проведения СПО</li> <li>7. Усталостное разрушение металла</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Полет на забой скважины, останов оборудования</li> <li>2. Недобор нефти, убытки компании</li> <li>3. Несоблюдение сроков проведения ТОиР, непредвиденные расходы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Использование качественных деталей при изготовлении / ремонте</li> <li>2. Проведение входного контроля</li> <li>3. Действия персонала при подтверждении отказа в соответствии с требованиями ЛНД</li> <li>4. Применение различных методов борьбы с коррозией</li> </ol>



**Схема мониторинга причин и следствий, связанных с отказом  
в работе ЭПУ по электрическим причинам**

Характер отклонений	Причины	Последствия	Действия
Отсутствие «звезды»	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пробой изоляции</li> <li>2. Брак изготовления</li> <li>3. Механическое повреждение кабеля – нарушение изоляции (токопроводящей жилы)</li> <li>4. Нарушение технологии проведения СПО</li> <li>5. Негерметичность системы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Авария по причине КЗ</li> <li>2. Аварийный останов скважины, недобор нефти, убытки компании</li> <li>3. Несоблюдение сроков проведения ТОиР, непредвиденные расходы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Недопущение теплового воздействия и нагрузок на электрочасть выше допустимых</li> <li>2. Проведение входного контроля</li> <li>3. Проведение стендовых испытаний в полном объеме и в соответствии с требованиями директивных документов</li> </ol>
КЗ обмотки ПЭД	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пробой изоляции</li> <li>2. Брак изготовления</li> <li>3. Брак монтажа</li> <li>4. Низкое качество масла</li> <li>5. Негерметичность системы</li> <li>6. Превышение нагрузок сверх допустимых</li> <li>7. Заклинивание оборудования механической части ЭПУ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аварийный останов ПЭД, возможен пожар</li> <li>2. Аварийный останов скважины, недобор нефти, убытки компании</li> <li>3. Несоблюдение сроков проведения ТОиР, непредвиденные расходы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Недопущение теплового воздействия и нагрузок на электрочасть выше допустимых</li> <li>2. Проведение входного контроля</li> <li>3. Проведение стендовых испытаний в полном объеме и в соответствии с требованиями директивных документов</li> </ol>
Снижение качества изоляции между жилами и землей	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пробой изоляции кабеля</li> <li>2. Брак изготовления</li> <li>3. Брак монтажа</li> <li>4. Скрытый заводской дефект кабеля</li> <li>5. Нарушение технологии ремонта кабеля</li> <li>6. Повреждение кабельной линии при изготовлении, транспортировке или монтаже</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аварийный останов ПЭД, возможен пожар</li> <li>2. Аварийный останов скважины, недобор нефти, убытки компании</li> <li>3. Несоблюдение сроков проведения ТОиР, вывод в ремонт оборудования, непредвиденные расходы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Недопущение нагрузок выше допустимых</li> <li>2. Проведение входного контроля</li> <li>3. Проведение стендовых испытаний в полном объеме</li> <li>4. Проведение всех операций с кабельной линией в соответствии с требованиями действующей НТД и ЛНД</li> </ol>

На сегодняшний день данный метод представляет собой безотказную методику по повышению надежности ЭПУ и ПЭД НГДП, прошедшую апробацию на промышленных предприятиях автомобилестроения в течение десятков лет и доказавшую свою эффективность.

В рамках данной работы метод FMEA-анализа направлен на решение следующих задач:

- формирование перечня всех возможных дефектов с выборкой по отказам, имеющим наибольшую плотность возникновения и наивысший класс опасности для оборудования, на основании данных статистики о технологических нарушениях на ЭПУ АО «Самаранефтегаз» в Поволжском регионе. При этом учитывается опыт изготовления (заводские дефекты) и испытаний оборудования, а также опыт реальных действий и вероятных ошибок эксплуатирующего персонала в процессе производства, эксплуатации, ТОиР ЭПУ;
- определение в зависимости от вида предполагаемого отказа (дефекта) возможных отрицательных вариантов его возникновения и анализ тяжести сопутствующих последствий с дальнейшей количественной и качественной оценкой их значимости;
- определение с оценкой частоты причины возникновения для каждого возможного дефекта на основании свойств и особенностей конструкции, технологического процесса, условий эксплуатации, ТОиР и т. д.;
- определение на основе анализа технологического процесса корректности и достаточности предлагаемых и принятых мер по предупреждению дефектов в эксплуатации, их обнаружению и устранению во время проведения ТОиР с количественной оценкой возможности исключения возникновения дефектов путем фиксации причин их происхождения на этапах эксплуатации и изготовления элементов ЭПУ;
- оценка в виде численных значений обобщенного балла критичности каждого отказа, дефекта (с его причиной) по так называемому приоритетному числу риска (ПЧР) [16]. При высоких значениях ПЧР следует произвести усовершенствование технологического процесса или оборудования, а также выполнить доработку системы мониторинга и диагностики, проведения ТОиР, пересмотреть требования правил эксплуатации с целью снижения данного показателя.

Проведение FMEA-анализа – достаточно сложная процедура, в основе которой лежит работа группы экспертов по техническим направлениям изготовления, эксплуатации и испытания погружного оборудования скважины. На рис. 2 представлен алгоритм применения метода FMEA-анализа для оценки производственных рисков в эксплуатации парка ЭПУ НГДП. В соответствии с представленным алгоритмом процесс FMEA-анализа [4, 5] условно разделяют на этапы. На первом этапе выполнена выборка дефектов, имеющих наибольшую частоту возникновения, и составлена диаграмма К. Исикавы [3], предложена схема мониторинга причин и следствий, связанных с технологическим отказом в работе ЭПУ. На следующем этапе выполнена оценка комплексного риска дефекта по критериям, установленным ГОСТ Р 51901.12-2007 (МЭК 60812:2006) «Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов» [16].

Для каждого рассмотренного дефекта следует определить его балл значимости «*S*», балл возникновения «*O*» и балл обнаружения «*D*» [17]. После получения экспертных оценок *S*, *O*, *D* вычисляют приоритетное число риска (ПЧР) [3, 18] (табл. 3):

$$ПЧР = S \cdot O \cdot D. \quad (1)$$

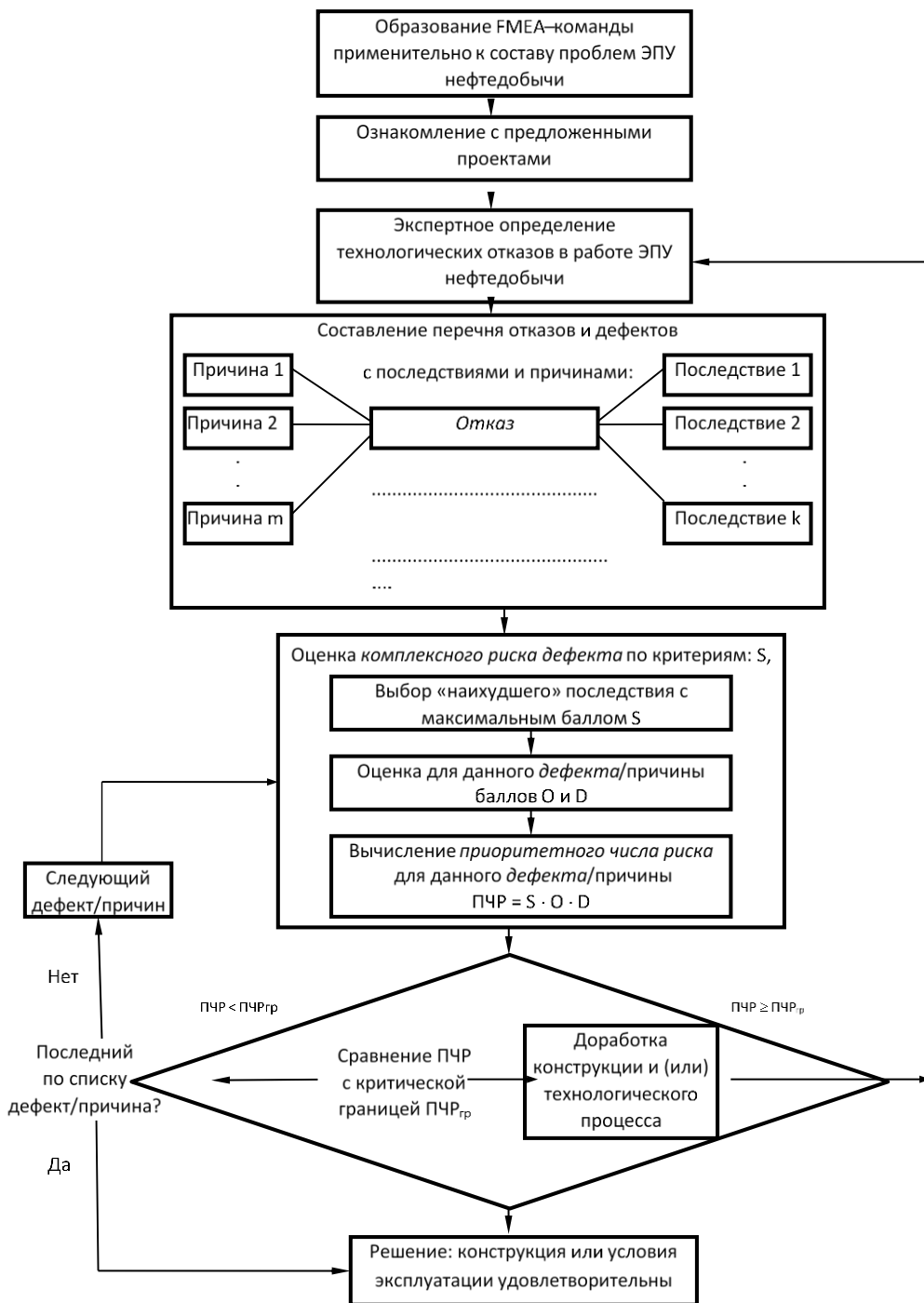


Рис. 2. Алгоритм применения метода FMEA-анализа для оценки производственных рисков в эксплуатации парка ЭПУ НГДП

**Основные причины, влияющие на технологический отказ в работе ЭПУ,  
с вычислением приоритетного значения риска**

Причины	Баллы			
	S	O	D	ПЧР
Полет (расчленение узла)	5	4	8	160
Клин	7	6	8	336
Слом вала (шлицевой муфты)	7	5	4	140
Отсутствие «звезды»	6	5	4	130
Снижение изоляции между жилами и землей	8	9	9	648
КЗ обмотки ПЭД	9	8	8	576

Согласно алгоритму работы по методу FMEA-анализа, приведенному на рис. 2, для «обобщенного балла критичности» должна быть установлена величина критического значения приоритетного числа риска, так называемая критическая граница ( $ПЧР_{кр}$ ), которая находится в пределах значений  $ПЧР$  100–125. Для дефектов с  $ПЧР > 100$ , в некоторых случаях  $> 125$ , следует вести доработку конструкции ЭПУ и ПЭД [16, 19, 20] либо изменение, совершенствование производственного процесса. Анализируя данные, полученные в процессе исследования, можно установить, что все рассмотренные технологические нарушения имеют  $ПЧР$  от 130 до 648 и, следовательно, высокий риск возникновения. Данное обстоятельство еще раз свидетельствует об актуальности темы исследования и необходимости внедрения в производственный процесс добычи углеводородов результатов данной работы.

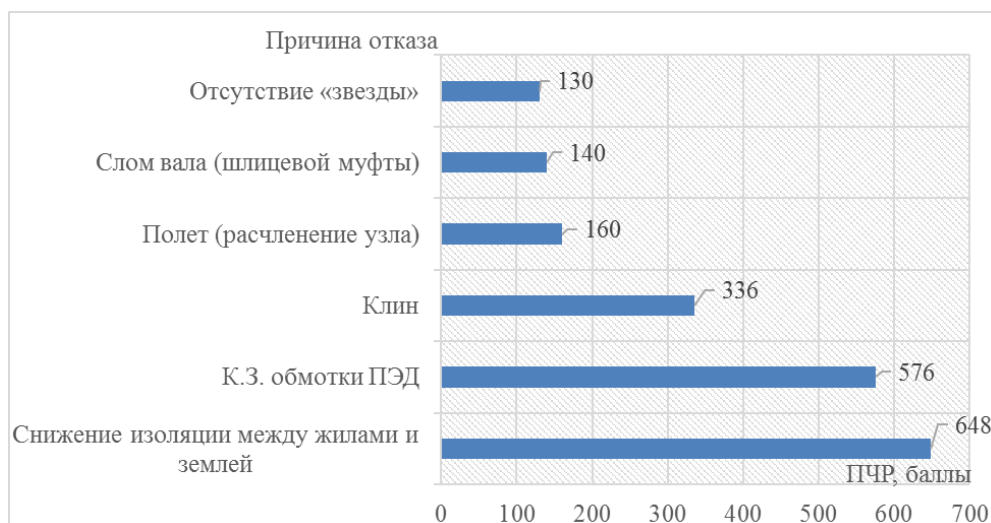


Рис. 3. Диаграмма Парето основных причин, влияющих на отказ в работе ЭПУ НГДП

На основании выполненного анализа и проведенных расчетов по методу FMEA-анализа выполняется построение диаграммы Парето [21]. Она используется при выявлении наиболее значимых и существенных факторов, влияющих на возникновение несоответствий или брака. Это дает возможность установить

приоритет действиям, необходимым для решения проблемы. Диаграмма Парето и ее графическое отображение – правило Парето – позволяют отделить важные факторы от малозначимых и несущественных [22, 23].

В менеджменте качества применение этого правила показывает, что значительное число несоответствий и дефектов возникает из-за ограниченного числа причин. Часто правило Парето формулируется как 80 на 20 [24, 25]. Например, если применить это правило по отношению к дефектам, то окажется, что 80 процентов дефектов возникает из-за 20 процентов причин. На графике, представленном на рис. 3, отражены основные причины, ранжированные по значимости влияния на отказ в работе ЭПУ.

### **Выводы**

1. Обработан и проанализирован статистический материал аварийности ЭПУ и ПЭД в АО «Самаранефтегаз», составлена диаграмма К. Исикавы, позволяющая в графической форме установить наиболее существенные причинно-следственные взаимосвязи между факторами и последствиями возникновения технологических нарушений в эксплуатации ЭПУ и ПЭД.

2. На основе диаграммы К. Исикавы выполнен мониторинг, составлена схема мониторинга, которая устанавливает взаимосвязь между явлениями возникновения отказов в работе ЭПУ и ПЭД, причинами их возникновения, последствиями и предложенными действиями по их исключению в процессе дальнейшей эксплуатации. На данной схеме описаны основные составляющие диаграммы причинно-следственной связи оценки надежности функционирования ЭПУ и ПЭД, а именно: для электрической причины возникновения отказа элементов электротехнического комплекса ЭПУ – снижение изоляции между жилами и землей, КЗ обмотки ПЭД, отсутствие «звезды» (нарушение целостности цепи); для технологической причины отказа (нет подачи) – полет (расчленение узла), слом вала, клин. Остальные виды технологических нарушений являются более частными случаями либо следствием рассмотренных отказов и устраняются по разработанным алгоритмам.

3. Составлена и описана оригинальная методика анализа видов и последствий потенциальных отказов, или FMEA-анализ применительно к НГДП. Получены экспертные оценки и рассчитано приоритетное число риска возникновения каждого отказа, позволяющие дать оценку степени влияния факторов на проблему надежности функционирования ЭПУ и ПЭД. Установлено, что наивысший риск для предприятия составляют отказы, связанные со снижением изоляции между жилами и землей (ПЧР = 648 баллов), КЗ обмотки ПЭД (ПЧР = 576 баллов) и клином УЭЦН (ПЧР = 336 баллов). На основании данных FMEA-анализа составлена диаграмма Парето основных причин, влияющих на отказ в работе ЭПУ НГДП.

4. Выполнена реализация комплексного технико-экономического подхода к решению проблемы повышения надежности технической системы (ЭПУ и ПЭД), основанного на применении методов и инструментов системы менеджмента качества. Результаты проведенного исследования служат основой для дальнейшего экономического расчета рентабельности производства АО «Самаранефтегаз» и принятия взвешенных решений, направленных на устранение узких мест эксплуатации погружного оборудования нефтедобычи.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гольдштейн В.Г., Романов В.С.* Методы динамического совершенствования повышения энергоэффективности и надежности погружных электродвигателей нефтедобычи // Динамика систем, механизмов и машин. Динамика электротехнических комплексов и систем. – 2017. – Том 5. – № 3. – С. 96–100.
2. *Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Можжаев В.Д.* Интеллектуальный подход к построению электроснабжения нефтяной отрасли // XIII Международная научно-практическая конференция «Ашировские чтения». – Самара: СамГТУ, 2016.
3. *Исикава К.* Японские методы управления качеством. – М: Экономика, 1988. – 199 с.
4. *Данилова С.Ю., Искосков М.О., Руденко А.А.* Анализ научных подходов по управлению производственными системами на предприятиях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – № 16. – С. 1845–1848.
5. *Benjamin Blanchard S.* Logistics Engineering & Management (6th Edition) / Benjamin S. Blanchard. – New York: Prentice Hall, 6th Edition, 2003. – 560 p. – ISBN 0131429159 / 0 13 142915 9.
6. *Романов В.С., Гольдштейн В.Г.* Обзор современного состояния погружных электродвигателей в нефтедобыче с выработкой рекомендаций по повышению энергоэффективности и надежности // XII Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике». – Казань: КГЭУ, 2017. – С. 139–145.
7. *Romanov V.S.* The dynamic improvement methods of energy efficiency and reliability of oil production submersible electric motors / V.S. Romanov, V.G. Goldstein: IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – Volume 944, № 012099, conference 1, 2018.
8. *Сушков В.В., Сухачев И.С.* Мероприятия повышения надежности эксплуатации УЭЦН при воздействиях внутренних и внешних перенапряжений // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы VI международной научно-практической конференции / отв. ред. А.В. Коричко. – Нижневартовск: НВГУ, 2016. – Том 2. – С. 131–133.
9. *Ишмурзин А.А., Пономарев Р.Н.* Анализ влияния геологических факторов на аварийность УЭЦН // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 4. – С. 89–96.
10. *Салахов А.Х., Гафаров А.Р., Мухамедьяров Д.А.* Обзор современных конструкций погружных электрических двигателей, эксплуатируемых при нефтедобыче в условиях Крайнего Севера. – ТПУ. – 2015. – Секция 4. – С. 279–281.
11. *Перельман О.М.* Методика определения надежности погружного оборудования и опыт ее применения / О.М. Перельман, С.Н. Пещеренко, А.И. Рябинович, С.Д. Слепченко // Технологии ТЭК. – 2005. – № 3. – С. 66–73.
12. *Таджибаев А.И.* Научные основы систем оценки технического состояния электрооборудования электротехнических комплексов: Дисс. ... докт. техн. наук: 05.09.03. – Самара, 2006. – 373 с.
13. *Нурбосынов Д.Н., Табачникова Т.В., Швецова Л.В., Нурбосынов Э.Д.* Сравнительный анализ энергетических эксплуатационных параметров электротехнических комплексов добывающих скважин с различными видами насосных установок / Промышленная энергетика. – 2013. – № 4. – С. 35–37.
14. *Данилова С.Ю., Искосков М.О.* Подходы к управлению производственными системами на предприятиях // Стратегическое планирование развития городов и регионов. Памяти первого ректора ТГУ С.Ф. Жилкина: IV Международная научно-практическая конференция (Тольятти, 30 июня 2014 г.): сб. науч. трудов: в 2 ч. / отв. ред. Ю.А. Анисимова. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. – Ч. 1. – С. 333–337.
15. *Детмер У., Шрагенхайм Э.* Производство с невероятной скоростью: улучшение финансовых результатов предприятия: пер. с англ. – М.: Альпина Паблшерз, 2009. – 330 с. – ISBN 978-5-9614-1047-1.
16. ГОСТ Р 51901.12-2007 (МЭК 60812:2006). Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов.
17. *Ольве Н.Г., Пои Ж., Ветер М.* Сбалансированная система показателей: практическое руководство по использованию сбалансированной системы показателей: пер. с англ. Э.В. Кондукова, И.С. Половица. – М.: Вильямс, 2006. – 304 с. – ISBN 5-8459-0917-1.
18. *Chalice R.* Improving Healthcare Using Toyota Lean Production Methods: 46 Steps for Improvement, Second Edition (2nd Edition) / Robert Chalice. – New York : ASQ Quality Press, 2nd Edition, 2007. – 300 p. – ISBN 0873897137 / 0 87389 713 7.
19. *Костельс М.* Информационная эпоха: экономика, общество, культура: пер. с англ. / М. Костельс; под. науч. ред. О.И. Шкаратана. – М.: Высшая школа экономики, 2010. – 608 с. – ISBN 5-7598-0069-8.

20. *Taiuti O.* Производственная система Тойоты: уходя от массового производства / пер. с англ. А. Грязнова, А. Тяглова. – М.: Изд-во ИКСИ, 2008. – 194 с. – ISBN 978-5-902677-04-1.
21. *Hammer M.* Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution / M. Hammer, J. Champy. – New York: Harper Collins, 1993. – 272 p. – ISBN 0-060559-53-5.
22. *Hemkumar C. Patankar.* Revolutionising Economic Performance With Taguchi Methodology / C. Hemkumar // 44th European Quality Congress. – 2009. – P. 207–213.
23. *Jan B.H.* Interorganizational Governance in Marketing Channels / B.H. Jan // Journal of Marketing. – 1994. – № 1. – P. 85.
24. *Брайан Маскелл, Брюс Багтали.* Практика бережливого учета: управленческий, финансовый учет и система отчетности на бережливых предприятиях / Пер. с англ. – М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2010. – 384 с. ISBN 978-5-903148-33-2.
25. *Кох Р.* Принцип 80/20. – М.: Эксмо, 2011. – 340 с.

*Статья поступила в редакцию 15 мая 2018 г.*

## **APPLICATION OF QUALITY MANAGEMENT MECHANISMS TO INCREASE THE RELIABILITY OF OPERATION OF THE ELECTRICAL TECHNICAL COMPLEX OF UNDERGROUND OIL PRODUCTION INSTALLATIONS**

***V.G. Goldstein, V.S. Romanov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *The paper proposes a method for increasing the reliability of operation of electric submersible installations (ESI) for oil production, based on the use of quality management mechanisms, such as the diagrams of K. Ishikawa and V. Pareto, as well as the method for analyzing the types and consequences of potential failures. FMEA analysis (Failure Mode and Effects Analysis). Each of these mechanisms is strategically aimed at solving specific problems - K. Ishikawa's diagram (or the fish bone diagram) allows us to graphically determine the most significant cause-effect relationships between the factors and consequences in the problem under study; the FMEA method allows to analyze the technological irregularities, to forecast potentially possible failures (defects), to establish the causes and consequences of their occurrence, to assess the emerging risks and to take measures to eliminate, prevent and reduce damage from their occurrence; on the basis of the FMEA analysis, the construction of the Pareto diagram is carried out, which makes it possible to prioritize the actions necessary to solve the problem. As a result, "narrow" locations in the operation of the ESI are identified and recommendations for their elimination are developed.*

**Keywords:** *submersible electric equipment, submersible electric motors, oil production, reliability, failure statistics data, K. Ishikawa diagram, V. Pareto diagram, FMEA analysis, technological violations.*

---

*Valery G. Goldstein (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Vladimir S. Romanov, Postgraduate student.*

## REFERENCES

1. *Goldstein V.G., Romanov V.S.* Methods of dynamic improvement of energy efficiency and reliability of submersible electric motors of oil production // *Journal of Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Dynamics of electrotechnical complexes and systems.* – 2017. – Volume 5. – No. 3. – P. 96–100.
2. *Romanov V.S.* Intellectual approach to the construction of power supply to the oil industry / V.S. Romanov, V.G. Goldstein, V.D. Mozhaev: XIII International Scientific and Practical Conference «Ashyrov readings». – Samara: SamSTU, 2016.
3. *Ishikawa K.* Japanese methods of quality management. – M: Economics, 1988. – 199 p.
4. *Danilova S.Yu., Iskoskov M.O., Rudenko A.A.* Analysis of scientific approaches to the management of production systems at enterprises // *Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* – 2014. – № 16. – S. 1845–1848.
5. *Benjamin Blanchard S.* Logistics Engineering & Management (6th Edition) / Benjamin S. Blanchard. – New York: Prentice Hall, 6th Edition, 2003. – 560 p. – ISBN 0131429159 / 0 13 142915 9.
6. *Romanov V.S.* Review of the current state of submersible electric motors in oil production with the development of recommendations for improving energy efficiency and reliability / V.S. Romanov, V.G. Goldstein: XII All-Russian Open Youth Scientific and Practical Conference «Dispatching and Management in the Electric Power Industry». – Kazan: KGEU, 2017. – pp. 139–145.
7. *Romanov V.S.* Methods for dynamically improving energy efficiency and reliability of submersible electric motors for oil production / V.G. Goldstein, V.S. Romanov // *Journal of Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Dynamics of electrotechnical complexes and systems.* 2017. – Volume 5. – No. 3. – P. 96–100.
8. *Sushkov V.V.* Measures to improve the reliability of ESP operation under the influence of internal and external overvoltages / V.V. Sushkov, I.S. Sukhachev // *Culture, science, education: problems and prospects: materials of the VI International Scientific and Practical Conference / otv. Ed. A.V. Korichko.* – Nizhnevartovsk: NVNGU, 2016. – Volume 2. – P. 131–133.
9. *Ishmurzin A.A., Ponomarev R.N.* Analysis of the influence of geological factors on the ESP accident rate // *Neftegazovoye delo.* – 2008. – No. 4. – P. 89–96.
10. *Salakhov A.Kh., Gafarov A.R., Mukhamedyarov D.A.* Overview of modern designs of submersible electric motors used in oil production in the extreme north. – TPU. – 2015. – Section 4. – P. 279–281.
11. *Perelman O.M.* Methods for determining the reliability of submersible equipment and the experience of its application / O.M. Perelman, S.N. Peshcherenko, A.I. Ryabinovich, S.D. Slepchenko // *Technologies of Fuel and Energy Complex.* – 2005. – № 3. – P. 66–73.
12. *Tadjibaev A.I.* Scientific foundations of systems of an estimation of a technical condition of an electric equipment of electrotechnical complexes: Dis .... kand. Doct. tech. Sciences: 05.09.03. – Samara, 2006. – 373 p.
13. *Nurbosynov D.N., Tabachnikova T.V., Shvetskova L.V., Nurbosynov E.D.* Comparative analysis of energy performance parameters of electrotechnical complexes of producing wells with various types of pumping units / *Industrial power.* – 2013. – No 4. – P. 35–37.
14. *Danilova S.Yu., Iskoskov M.O.* // Strategic planning of the development of cities and regions. In memory of the first rector of TSU S.F. Zhilkina: IV International Scientific and Practical Conference (Togliatti, June 30, 2014): a collection of scientific papers: at 2 pm / ot. Ed. Yu.A. Anisimova. – Togliatti: Publishing house of TSU, 2014. – Part 1. – S. 333–337.
15. *Detmer U.* Production with incredible speed: improving the financial results of the enterprise: Per. with English / W. Detmer, E. Shragenheim. – M.: Alpina Publishers, 2009. – 330 p. – ISBN 978-5-9614-1047-1.
16. GOST R 51901.12-2007 (IEC 60812: 2006). Risk management. Method for analyzing the types and consequences of failures.
17. *Olve N.G.* Balanced Scorecard: A Practical Guide to Using a Balanced Scorecard / N.G. Olve, Zh. Roy, M. Vetter; trans. with English. E. V.V. Kondukova, I.S. Polovitsa. – M.: Williams, 2006. – 304 p. – ISBN 5-8459-0917-1.
18. *Chalice R.* Improving Healthcare Using Toyota Lean Production Methods: 46 Steps for Improvement, Second Edition (2nd Edition) / Robert Chalice. – New York : ASQ Quality Press, 2nd Edition, 2007. – 300 p. – ISBN 0873897137 / 0 87389 713 7.
19. *Kostels M.* Information Age: Economics, Society, Culture: Per. with English. M. Costels; under. sci. Ed. O.I. Shkaratan. – M.: Higher School of Economics, 2010. – 608 c. – ISBN 5-7598-0069-8.



20. *Taiichi O.* Toyota Production System: Leaving Mass Production / O. Tayiti; trans. with English. A. Gryaznov, A. Tyaglova. – M.: IKSI Publishing House, 2008. – 194 p. – ISBN 978-5-902677-04-1.
21. *Hammer M.* Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution / M. Hammer, J. Champy. – New York: Harper Collins, 1993. – 272 p. – ISBN 0-060559-53-5.
22. *Hemkumar C. Patankar.* Revolutionising Economic Performance With Taguchi Methodology / C. Hemkumar // 44th European Quality Congress. – 2009. – P. 207–213.
23. *Jan B.H.* Interorganizational Governance in Marketing Channels / B.H. Jan // Journal of Marketing. – 1994. – № 1. – P. 85.
24. *Brian Maskell, Bruce Bagtali.* Practice of lean accounting: management, financial accounting and reporting system at lean enterprises / Per. with English. – Moscow: Institute for Comprehensive Strategic Studies. 2010. – 384 s. ISBN 978-5-903148-33-2.
25. *Koch R.* Principle 80/20. – M.: Exmo, 2011. – 340 with.

УДК 621.365

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

*А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин, Д.А. Животягин*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aidanilushkin@mail.ru; vasilydan2013@yandex.ru; Denis.Zhivotyagin@arconic.com

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы оптимального проектирования трехфазного индуктора для нагрева крупногабаритных цилиндрических заготовок. Отмечены специфические особенности рассматриваемых в работе индукционных нагревателей. Нагрев осуществляется в поперечном магнитном поле. Это обстоятельство существенно сказывается на распределении источников тепла в нагреваемой заготовке. Наличие источников тепла в торцевых частях заготовки позволяет компенсировать тепловые потери и повысить равномерность температурного распределения по аксиальной координате. Решена одна частная задача оптимального проектирования по критерию максимального общего коэффициента полезного действия индуктора. Поиск оптимальных параметров проводится на основе двумерной модели. В качестве варьируемых параметров рассматриваются материал и толщина футеровки, количество пазов и зубцов статора и соотношение их размеров. Другие параметры, оказывающие существенное влияние на величину к.п.д., рассматриваются как ограничения. Анализ влияния перечисленных выше параметров на общий коэффициент полезного действия установки основан на многократном уточнении результатов в процессе итерационного проектирования.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, магнитная проницаемость, плотность тока, температура, коэффициент полезного действия, оптимальное проектирование.

В технологических комплексах обработки металла на деформирующем оборудовании нагрев крупногабаритных заготовок производится в индукционных установках промышленной частоты. Распространенные конструкции индукционных нагревателей большой мощности, функционирующих на промышленной частоте, представляют собой систему индукторов, питающихся от трехфазной сети [1, 2]. Количество индукторов зависит от производительности комплекса и не всегда кратно трем. По этой причине, а также вследствие взаимной индуктивности катушек индукторов возникает существенная несимметрия трехфазной нагрузки, несмотря на равенство собственных сопротивлений отдельных секций многосекционного нагревателя. Следствием этого является неравномерная загрузка фаз питающей сети, превышающая установленные нормы несимметрии сети [3, 4, 5]. Снизить несимметрию напряжений можно при помощи специаль-

---

*Александр Иванович Данилушкин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Василий Александрович Данилушкин (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Денис Александрович Животягин, аспирант.*

ных симметрирующих устройств. В то же время их применение приводит к завышенной стоимости, так как стоимость и массогабаритные показатели симметрирующих устройств сравнимы с аналогичными показателями индукционной установки. Кроме того, в условиях изменяющихся при нагреве параметров нагрузки системы «индуктор – металл» необходимо использовать регулируемые симметрирующие устройства. Это еще более повышает капитальные затраты и габариты индукционной установки [5, 6, 7, 8]. Указанное обстоятельство приводит к необходимости совершенствования и создания новых модификаций индукционных нагревательных установок с целью снижения капитальных и эксплуатационных затрат. В работе в качестве альтернативного варианта рассматривается трехфазный индукционный нагреватель для сквозного нагрева крупногабаритных цилиндрических заготовок, отличие которого заключается в конструктивном исполнении индуктора с замкнутым магнитопроводом в форме статора трехфазного асинхронного электродвигателя [9, 10]. При симметричном расположении нагреваемого цилиндра и симметричной трехфазной системе обмоток индуктора несимметрия в системе «индуктор – загрузка» отсутствует. Кроме того, наличие замкнутого магнитопровода позволяет уменьшить величину реактивной мощности и количество конденсаторов для ее компенсации.

Для расчета параметров индукционной системы необходимо решить ряд задач, связанных с разработкой математической модели и исследованием взаимосвязанных электротепловых процессов в системе, содержащей магнитопровод, трехфазную обмотку индуктора, футеровку и нагреваемый цилиндр. Применение известных моделей и инженерных методик расчета для цилиндрических индукционных нагревателей продольного магнитного поля для расчета параметров предлагаемой конструкции не представляется возможным в силу ряда принципиальных конструктивных особенностей. Геометрическая модель исследуемой индукционной системы представлена на рис. 1.

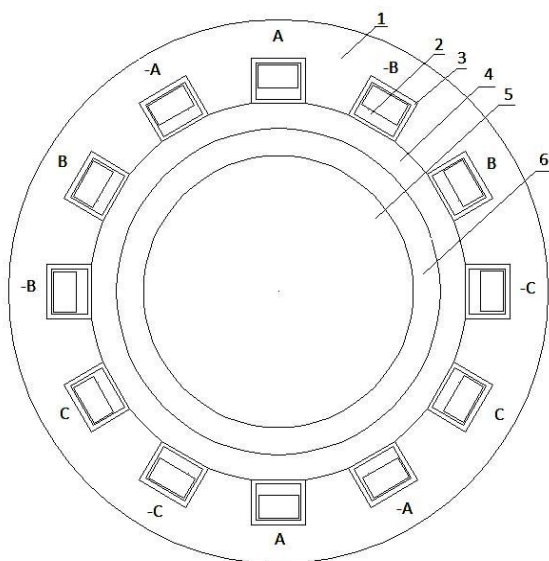


Рис. 1. Трехфазный индуктор с магнитопроводом:  
 1 – магнитопровод; 2 – водоохлаждаемый виток обмотки; 3 – изоляция витка;  
 4 – футеровка; 5 – загрузка; 6 – воздушный зазор

Систему «трехфазный индуктор – металлический цилиндр» можно с определенным приближением рассматривать как асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в режиме короткого замыкания [9]. Однако исследуемый объект имеет существенные отличия, заключающиеся в наличии футеровки, увеличивающей зазор между статором и ротором (индуктором и нагреваемым цилиндром), что нехарактерно для асинхронных машин. Кроме того, в процессе нагрева в широких пределах изменяется удельное сопротивление нагреваемого цилиндра. В связи с указанными обстоятельствами для исследования процессов нагрева и расчета конструктивных и режимных параметров оптимальной конструкции трехфазного индукционного нагревателя с замкнутым магнитопроводом предложена методика, включающая численное моделирование электромагнитных и тепловых полей в системе «трехфазный индуктор – цилиндрическая заготовка».

Математическая модель процесса индукционного нагрева цилиндрической заготовки в поперечном магнитном поле может быть представлена системой взаимосвязанных уравнений [10, 11]:

– для электромагнитной задачи

$$\frac{\partial(\mu_a(H(r, x, \tau), T)H(r, x, \tau))}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{1}{\sigma(T)} \frac{\partial H(r, x, \tau)}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\sigma(T)} \frac{\partial H(r, x, \tau)}{\partial x} \right) = 0; \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$\frac{\partial H(0, x, \tau)}{\partial r} = 0;$$

$$H(R, L, \tau) = u(\tau)f(H, \tau);$$

– для тепловой задачи

$$c(T)\gamma \frac{\partial T(r, \theta, x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda(T) \frac{\partial T(r, \theta, x, \tau)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \lambda(T) \frac{\partial T(r, \theta, x, \tau)}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T(r, \theta, x, \tau)}{\partial x} \right) + q_v(\tau); \quad (2)$$

с краевыми условиями

$$\frac{\partial T(0, x, \tau)}{\partial r} = 0; \quad \lambda(T) \frac{\partial T(R, x, \tau)}{\partial r} = -Q_{II}(\tau, T(R, x, \tau));$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(r, 0, \tau)}{\partial x} = \lambda(T) \frac{\partial T(r, L, \tau)}{\partial x} = Q_{II}(\tau, T(r, 0, \tau));$$

$$T(r, x, 0) = T_0(r, x); \quad r \in [0, R]; \quad x \in [0, L].$$

Здесь  $H(r, x, \tau)$  – напряженность магнитного поля;  $\sigma(T)$  – удельная электропроводимость;  $\mu_a$  – магнитная проницаемость;  $r, x$  – радиальная и осевая координаты объекта;  $\tau$  – время;  $T(r, x, \theta, \tau)$  – температура;  $\theta$  – угловая координата;

$\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности;  $q_v(\tau)$  – удельная мощность тепловыделения;  $c(T)$  – удельная теплоемкость (в нелинейном случае это функция температуры, аппроксимированная кубическими сплайнами);  $\gamma$  – плотность,  $Q_n$  – тепловой поток с торцевых поверхностей заготовки.

Для решения задачи оптимального проектирования используются методы структурной и параметрической оптимизации технических объектов, которые позволяют рассматривать задачи оптимизации как многокритериальные [12, 13, 14]. На практике часто многокритериальная задача сводится к поиску одного наиболее важного частного критерия, а остальные конкурирующие критерии рассматриваются как ограничения.

В настоящей работе в качестве частного критерия рассматривается коэффициент полезного действия индукционной установки.

Задача оптимального проектирования индукционного нагревателя по критерию максимального коэффициента полезного действия формулируется следующим образом.

Для объекта, описываемого системой уравнений (1), (2) с соответствующими начальными и граничными условиями, необходимо найти такие значения величин конструктивных и режимных параметров системы индукционного нагрева, которые за заданное время обеспечивают максимальное значение общего коэффициента полезного действия при выполнении требуемого по технологии конечного распределения температуры по объему нагреваемого цилиндра

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (3)$$

в условиях существующих энергетических и технологических ограничений.

Здесь  $\eta_1$  – электрический КПД установки [15]:

$$\eta_1 = F_1(D_1, D_2, \rho_1, \rho_2, x_1, x_2, a_1, a_2); \quad (4)$$

$\eta_2$  – тепловой КПД:

$$\eta_2 = F_2(s_\phi, \alpha_\phi, \lambda_\phi(T))_\phi; \quad (5)$$

$\rho_1, \rho_2(T)$  – соответственно удельные сопротивления материала обмотки индуктора и металла заготовки;  $x_1$  – ширина паза;  $x_2$  – ширина зубца;  $h$  – высота паза;  $\Delta_1, \Delta_2$  – глубина проникновения тока соответственно в металл индуктора и металл заготовки;  $a_1, a_2$  – эффективная длина индуктора и заготовки соответственно;  $D_1, D_2$  – диаметры индуктора и заготовки;  $s_\phi$  – толщина футеровки;  $\alpha_\phi$  – коэффициент теплообмена между футеровкой и индуктором;  $\lambda_\phi(T)$  – коэффициент теплопроводности материала футеровки.

Энергетические и технологические ограничения принимают вид:

- удельная поверхностная мощность  $p_{0_{\max}} \leq 400 \text{ кВт/м}^2$  ;
- максимальная температура наиболее нагретой точки по сечению заготовки  $T_{\max}(r, x, \tau_{\text{кон}}) \leq 480^\circ \text{C}$  ;
- перепад температур по сечению заготовки на выходе из нагревателя  $(T_{\max} - T_u) = 15^\circ \text{C}$  ;

- максимальная индукция в магнитопроводе  $B_{\max} = 0,8 \text{ Тл}$ ;
- температура магнитопровода  $T_{\text{пов.магн}} \leq 60^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{магн.макс}} = 90^\circ\text{C}$ ;

Варьируемые параметры:

1. Количество пазов и зубцов индуктора (определяет степень неравномерности температур под пазом и зубцом и величину потока рассеяния в пазу).
2. Соотношение ширины  $x_1$  паза и  $x_2$  зубца (максимальное значение магнитной индукции, максимальное сечение провода индуктора).
3. Плотность  $\delta$  тока в индукторе.
4. Параметры футеровки: толщина стенки ( $s_{\text{ф}}$ ), коэффициент  $\lambda_{\text{ф}}(T)$  теплопроводности материала футеровки.

Результатом проектирования являются материалы магнитопровода и футеровки, геометрические размеры индуктора и его элементов, обеспечивающие в совокупности максимальный коэффициент полезного действия. К геометрическим размерам, определяющим общий коэффициент полезного действия, относятся прежде всего материал и толщина футеровки, число пазов, ширина паза и зубца магнитопровода. Анализ влияния перечисленных выше параметров на общий коэффициент полезного действия установки требует многократного уточнения результатов в процессе проектирования.

В качестве примера для исследования рассматривается индукционная установка для нагрева цилиндрической заготовки из алюминиевого сплава марки АД31. Размеры заготовки: диаметр 0,42 м, длина 0,8 м, масса 299,1 кг. Температура максимально нагретой точки  $460^\circ\text{C}$ , температура центра  $430^\circ\text{C}$ . Допустимое отклонение температуры  $\pm 10^\circ\text{C}$ . Напряжение питающей сети 380/220 В; частота 50 Гц. Максимальное значение индукции в магнитопроводе  $B_{\max}$  находится в пределах 1,19–1,33 Тл.

Физические свойства сплава: плотность  $2700 \text{ кг/м}^3$ ; температура плавления  $660^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплопроводности  $\lambda = 228 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ ; коэффициент теплоемкости  $C_p = 880 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ ; удельное сопротивление  $\rho = 2,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Поиск проводится на основе двумерной электромагнитной задачи. Перейдя от системы уравнений Максвелла [10] к формулировке с использованием векторного магнитного потенциала, можно записать дифференциальное уравнение с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - j\omega\sigma A = -\delta_{\text{ext}}; A|_L = 0. \quad (6)$$

Здесь  $A$  – векторный магнитный потенциал;  $\mu_x, \mu_y$  – относительная магнитная проницаемость материала по осям  $x, y$ ;  $j$  – мнимая единица;  $\omega$  – круговая частота тока;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость;  $\delta_{\text{ext}}$  – плотность стороннего тока. На базе уравнений (1), (2) строится конечно-элементная формулировка для плоской двумерной области [16]. В качестве программной реализации используется пакет Elcut [17]. Конечная система уравнений имеет вид

$$[K] \cdot \{U\} = \{I\}. \quad (7)$$

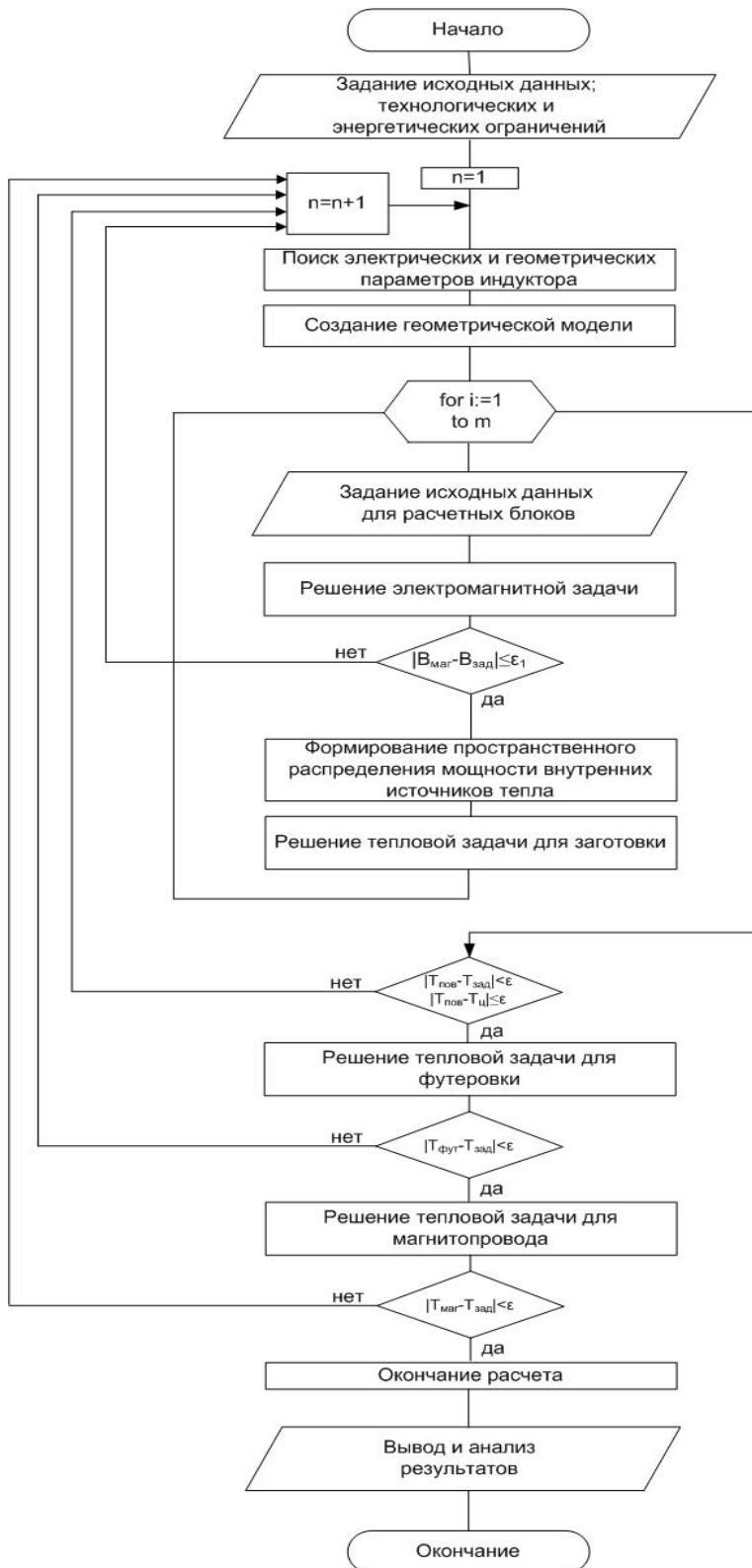


Рис. 2. Алгоритм расчета параметров индукционного нагревателя

Здесь  $[K]$ ,  $\{I\}$ ,  $\{U\}$  – матрица жесткости и векторы источников и неизвестных величин. Геометрическая модель тепловой задачи полностью повторяет модель электромагнитной задачи, источником нагрева является мощность внутренних источников тепла в цилиндре. Граничные условия, которые задаются на внешних поверхностях, позволяют учесть тепловые потери с поверхности цилиндра.

Алгоритм расчета оптимальных по критерию максимального общего коэффициента полезного действия параметров индукционного нагревателя представлен на рис. 2.

В отличие от нагрева цилиндра в продольном магнитном поле соленоидального индуктора в рассматриваемом индукторе нагрев осуществляется в поперечном магнитном поле, причем чередование активных проводников с током в пазу индуктора с зубцами магнитопровода приводит к неравномерному распределению плотности тока в нагреваемой заготовке по окружности. Картина распределения плотности тока в цилиндре по радиальной координате под проводником и зубцом магнитопровода приведена на рис. 3. Эта неравномерность отражается на температурном распределении в цилиндре, однако, как показывают исследования, разность температур цилиндра на окружностях одного радиуса наблюдается только в пределах глубины проникновения тока в цилиндр и не вносит существенных изменений в общую картину распределения температуры по сечению.

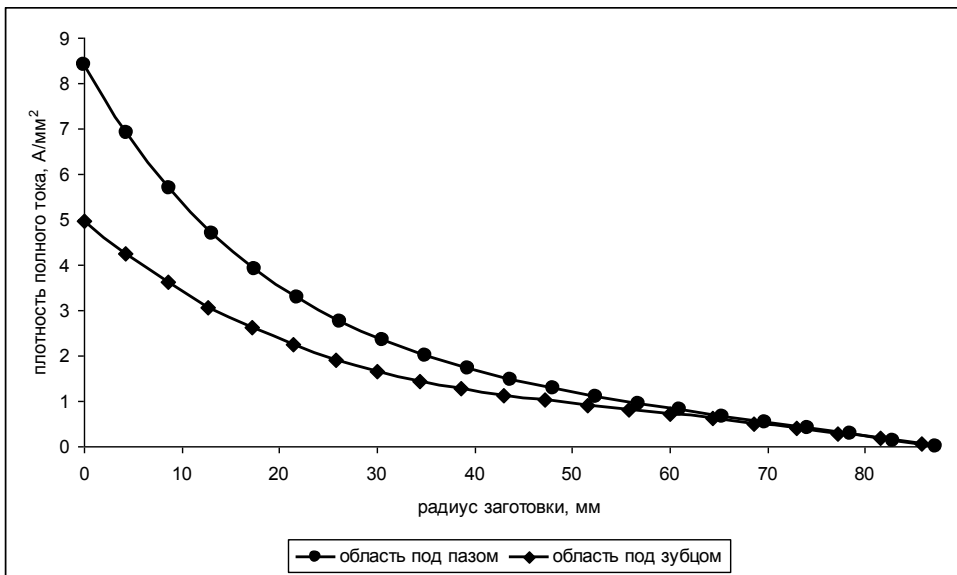


Рис. 3. Распределение плотности полного тока по радиальной координате

В таблице представлены параметры индуктора при различном соотношении размеров паза и зубца магнитопровода. Как следует из анализа полученных результатов, наиболее существенное влияние на общий коэффициент полезного действия оказывают количество пазов и зубцов магнитопровода, соотношение их размеров, материал и толщина тепловой изоляции. Наилучшие энергетические показатели индуктора соответствуют позиции 4 (см. таблицу).

Заключительным этапом расчета является определение интегральных параметров системы – числа витков и сечения проводов катушки индуктора, напря-



жения на индукторе в соответствии с выбранным напряжением источника питания. Материал футеровки – шамот. Проводник катушки индуктора: медная шинка сечением 4×12 мм; КПД 49,7 %;  $\cos\phi = 0,29$ ; магнитная индукция в магнитопроводе 0,8 Тл; мощность полезная 150,8 кВт; мощность полная 251,8 кВт; мощность индуктора 868 кВА.

Результаты проведенного анализа – максимальное значение индукции магнитопровода, графики зависимости мощности тепловыделения в заготовке, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности от варьируемых параметров – позволяют сделать вывод о степени влияния геометрических параметров на энергетические характеристики. В исследуемой установке значения указанных параметров определяются прежде всего характеристиками материала магнитопровода и футеровки, толщиной тепловой изоляции, количеством пазом и соотношением ширины паза и зубца магнитопровода при фиксированной толщине футеровки.

### Параметры индуктора при различном соотношении размеров паза и зубца

Параметр	№ позиции				
	1	2	3	4	5
Внутренний диаметр индуктора, мм	480	480	480	480	480
Внешний диаметр магнитопровода, мм	630	630	630	630	630
Толщина футеровки, мм	20	20	20	20	20
Ширина паза, мм	60	65	70	75	80
Ширина зубца, мм	63	58	53	48	43
Мощность в загрузке, кВт	152	150	149,8	150,8	149,8
Потери мощности, кВт	128	118	110	101	136
Мощность индуктора, кВт	280	268	259,8	251,8	285,8
Полная мощность, кВА	1037	1004	951	868	1039
КПД	0,42	0,447	0,453	0,497	0,428
Cos $\phi$	0,27	0,267	0,273	0,29	0,275

### Выводы

1. Эффективность установок индукционного нагрева определяется при прочих равных условиях предельно допустимым значением плотности тока в обмотке индуктора. В установках высокотемпературного индукционного нагрева максимальная плотность тока при принудительном водяном охлаждении индуктора определяется расходом воды и ее температурой на входе и составляет  $15\div 25 \text{ А/мм}^2$ . В предлагаемой конструкции индуктора система охлаждения должна дополнительно обеспечивать охлаждение магнитопровода индуктора, поэтому максимальное значение плотности тока желательно поддерживать на нижнем уровне.

2. При нагреве цилиндрической заготовки в поперечном магнитном поле трехфазного индуктора кроме неравномерности температурного распределения по радиусу заготовки появляется дополнительная неравномерность температурного распределения по окружности заготовки. Эта неравномерность зависит от

числа зубцов и пазов статора и соотношения их размеров. Для снижения неравномерности желательнее увеличивать их число. Однако увеличение числа пазов может привести к существенному уменьшению сечения зубца магнитопровода, а следовательно, к его насыщению. В связи с этим выбор количества пазов и зубцов должен производиться с учетом дополнительного требования к размерам сечения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Немков В.С., Демидович В.Б.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
2. Электрооборудование и автоматика электротермических установок: Справочник / Под ред. *А.П. Альтгаузена*. – М.: Энергия, 1978. – 304 с.
3. *Иванов В.С.* Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
4. *Наумов И.В.* Несимметричная нагрузка в сети 0,38 кВ и потери мощности // *Электротехника* (объединенный научный журнал). – 2002.– № 2. – С. 50–52.
5. *Аввакумов В.Г.* Уравновешивание электрической нагрузки в трехфазной четырехпроводной системе // *Известия вузов. Энергетика*. – 1978. – № 5. – С. 94–99.
6. *Наумов И.В.* Методика расчета показателей несимметрии токов и напряжений в сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством // *Вестник АлтГАУ им И.И. Ползунова*. – Барнаул: АлтГАУ, 2001. – № 2. – С. 49–56.
7. Современные энергосберегающие технологии: учеб. пособие для вузов / *Ю.И. Блинов [и др.]* – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. – 564 с.
8. *Немков В.С., Демидович В.Б., Руднев В.И.* Влияние конструкции и режимов работы индукционных нагревателей на их энергетические показатели // *Электротехника*. – М., 1986. – № 3. – С. 23–27.
9. *Данилушкин А.И., Никитина Е.А., Бойков Е.М.* Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения кузнечных индукционных нагревателей промышленной частоты // *Известия вузов. Электромеханика. Специальный выпуск «Электроснабжение»*. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. – С. 35–36. ISSN 0136-3360.
10. *Базаров А.А., Данилушкин А.И., Никитина Е.А.* Моделирование и расчет внутренних источников тепла в трехфазном индукторе с вращающимся магнитным полем // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2009. – Вып. 2(24). – С. 120–127.
11. *Вайнберг А.М.* Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 415 с.
12. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
13. *Уайлд Д.* Оптимальное проектирование. – М.: Мир, 1981. – 272 с.
14. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Metallurgia, 1993. – 279 с.
15. *Анищенко Л.М., Лавренюк С.Ю.* Математические основы проектирования высокотемпературных технологических процессов. – М.: Наука, 1986. – 78 с.
16. *Бате К., Вилсон Е.* Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
17. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.9. – СПб.: Производственный кооператив TOP, 2009.

*Статья поступила в редакцию 10 июня 2018 г.*

# PARAMETRIC ANALYSIS AND OPTIMAL DESIGN OF INDUCTION SYSTEM WITH RESPECT TO THE MAXIMUM EFFICIENCY CRITERIA

*A.I. Danilushkin, V.A. Danilushkin, D.A. Zhivotyagin*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *The problems of optimal design of a three-phase inductor for heating large-sized cylindrical billets are considered. The specific features of the induction heaters considered in the work are noted. Heating is realized in a transverse magnetic field. This circumstance significantly affects the distribution of heat sources in the heated billet. The presence of heat sources in the end parts of the billet makes it possible to compensate the thermal losses and increase the uniformity of the temperature distribution along the axial coordinate. One particular problem of optimal design was solved by the criterion of the maximum overall efficiency of the inductor. The search for optimal parameters is based on a two-dimensional model. As variable parameters, the material and thickness of the lining, the number of slots and teeth of the stator and the ratio of their dimensions are considered. Other parameters that have a significant effect on the efficiency value are considered as limitations. Analysis of the influence of the above parameters on the overall efficiency of the installation is based on multiple refinement of the results in the iterative designing process.*

**Keywords:** *induction heating, magnetic permeability, current density, temperature, coefficient of efficiency, optimal design.*

## REFERENCES

1. *Nemkov V.S., Demidovich V.B. Teoriya i raschet ustrojstv indukcionnogo nagreva [Theory and calculation of induction heating devices]. Leningrad, Energoatomizdat, 1988. 280 pp. (In Russian).*
2. *Elektrooborudovanie i avtomatika elektrotermicheskikh ustanovok: Spravochnik [Electrical equipment and automation of electrothermal processes: Reference book]. Pod red. A. P. Al'tgauzena. – Moscow. Energiya, 1978. – 304 pp. (In Russian).*
3. *Ivanov B.C. Rezhimy potrebleniya i kachestvo elektroenergii sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij [Consumption modes and quality of electric power of power supply systems of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 336 pp. (In Russian).*
4. *Naumov I.V. Unbalanced load in the 0,38 kV electric grid and power loss// *Elektrotehnika (Ob"edinennyj nauchnyj zhurnal)*. 2002. No 2. Pp. 50–52. (In Russian).*
5. *Avvakumov V.G. Balancing the electrical load in a three-phase four-wire system // *Izv. Vuzov. Energetika*. 1978. No5. Pp. 94-99. (In Russian).*
6. *Naumov I.V. Method for calculating the unbalance of currents and voltages in a 0.38 kV electric grid with a balancing device // *Vestn. AltGAU im I.I. Polzunova*. Barnaul. AltGAU, 2001. No2. Pp. 49–56. (In Russian).*
7. *Sovremennye energosberegayushchie tekhnologii: uchebnoe posobie dlya VUZov [Modern energy-saving technologies: a textbook for high schools] / Yu.I. Blinov [i dr.] Saint Petersburg. Izd-vo SPbGETU «LETI», 2000. 564 pp. (In Russian).*
8. *Nemkov V.S., Demidovich V.B., Rudnev V.I. Influence of design and operation modes of induction*

---

*Aleksandr I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Vasili A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor  
Denis A. Zhivotyagin, Postgraduate Student.*

- heaters on their energy performances // *Elektrotehnika*. 1986. No 3. – Pp. 23–27. (In Russian).
9. *Danilushkin A.I., Nikitina E.A., Bojkov E.M.* Improving the quality of electricity in power supply systems for forging induction heaters of industrial frequency // *Elektromekhanika. Izvestiya VUZov. Special'nyj vypusk «Elektrosnabzhenie»*. Novocherkassk. YURGTU (NPI). 2009. Pp. 35–36. (In Russian).
  10. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Nikitina E.A.* Modeling and calculation of internal heat sources in a three-phase inductor with a rotating magnetic field // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki*. 2009. No2(24). Pp. 120–127. (In Russian).
  11. *Vajnberg A.M.* Indukcionnye plavil'nye pechi [Induction Melting Furnaces]. Moscow, Energiya, 1967. 415 pp. (In Russian).
  12. *Lykov A.V.* Theory of heat conductivity. Vysshaya shkola, Moskva, 1967, 599 pp. (In Russian).
  13. *Uajld, D.* Optimal design. Moscow. Mir. 1981. 272 pp. (In Russian).
  14. *Rapoport E.Ya.* Optimization of induction heating of metal. – Moscow. Metallurgiya. 1993. 279 pp. (In Russian).
  15. *Anishchenko L.M., Lavrenyuk S.Yu.* Mathematical backgrounds of designing high-temperature technological processes. Moscow. Nauka. 1986. 78 pp. (In Russian).
  16. *Bate K., Vilson E.* Numerical analysis methods and finite element method. Moscow. Strojizdat, 1982. 448 pp. (In Russian).
  17. ELCUT. Simulation of two-dimensional fields by the finite element method. User guide. Version 5.9. Saint Petersburg. Proizvodstvennyj kooperativ TOR. 2009.

УДК 621.312

## ОПТИМИЗАЦИЯ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

**Ю.П. Кубарьков, И.С. Кулаев, Р.А. Алехин**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

**Аннотация.** Несмотря на преимущества возобновляемой распределенной энергии, увеличение ее объема приводит к серьезным изменениям характеристик электрической сети. Это особенно заметно в сетях низкого и среднего напряжения. На сегодняшний день основной метод регулирования напряжения в России – поддержание заданных уровней напряжения в контрольных точках распределительной сети. Существующая централизованная система регулирования режимных параметров не обеспечивает эффективности управления напряжением в сетях. Традиционные способы компенсации индуктивной реактивной мощности выполняются с помощью шунтирующих конденсаторных батарей. Такая установка оказывает и другие положительные эффекты на систему: повышение напряжения на нагрузке, лучшее регулирование напряжения (если батареи были надлежащим образом спроектированы), уменьшение потерь и сокращение или отсрочка инвестиций в передачу. Растущие возможности силовых электронных компонентов инициировали использование устройств FACTS. Более высокие уровни мощности стали доступны в конвертерах для самых высоких напряжений. Общие отправные точки – это сетевые элементы, влияющие на импеданс или реактивную мощность в отдельных частях энергосистемы.

Альтернативой традиционному способу регулирования напряжения является интеллектуальная энергетическая система с активно-адаптивной электрической сетью и мультиагентной системой управления.

Эффективность мультиагентного регулирования выше, чем у традиционных методов регулирования напряжения в распределительных сетях, что обусловлено адаптивностью системы и работой в режиме реального времени. Мультиагентное регулирование обеспечивает эффективное регулирование напряжения в рамках интересов всех субъектов, участвующих в процессе.

Внедрение интеллектуальной адаптивной системы регулирования напряжения способствует снижению потерь электроэнергии, повышению качества снабжения потребителей, повышению надежности системы и ее уровня пропускной способности.

**Ключевые слова:** интеллектуальная электрическая система, активно-адаптивная сеть, мультиагентное регулирование, источник реактивной мощности, стабилизация напряжения, потери мощности и энергии.

Напряжение в распределительных сетях постоянно изменяется. Это вызвано тем, что постоянно меняются нагрузка в сети, режим работы генераторов станций, топология сети. Режимы напряжения в сетях регламентируются ГОСТ 32144-2013. Однако по различным причинам отклонения напряжения в сетях ча-

---

*Юрий Петрович Кубарьков (д.т.н.), профессор кафедры «Электрические станции».  
Игорь Сергеевич Кулаев, студент.  
Роман Александрович Алехин, аспирант.*

сто превышают допустимые. Основными причинами падения напряжения в распределительных сетях являются: большие токи нагрузки, неправильный выбор сечений проводников и мощностей трансформаторов, неправильная топология распределительных сетей [1]. Поэтому для поддержания уровня напряжения в заданных рамках используют регулирование напряжения. В нашей стране основными средствами регулирования являются средства регулирования в трансформаторах (РПН, ПБВ), а также регуляторы возбуждения генераторов на станциях. В крупных разветвленных энергетических системах традиционные способы регулирования напряжения оказываются недостаточно эффективными.

На Западе давно ведутся разработки интеллектуальных энергосистем – Smart Grid. Согласно определению, Smart Grid – это модернизированные электрические сети, которые используют информационные и коммуникационные технологии для сбора информации о выработке и потреблении электроэнергии, позволяющей автоматически повышать эффективность, надежность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии.

В России ведутся аналогичные исследования и разработки в области интеллектуализации распределительных сетей [2, 3]. Данная разработка имеет название «Интеллектуальная энергетическая система с активно-адаптивной сетью». В активно-адаптивных сетях для регулирования напряжения и оптимизации потери мощности используются управляемые устройства компенсации реактивной мощности, которые и определяют адаптивные свойства системы [2].

### **Устройства регулирования реактивной мощности**

Интеллектуализация сетей достигается за счет внедрения новейших устройств сбора и обработки информации, устройств регулирования параметров сети, а также за счет использования управляемых источников активной и реактивной мощности, подключенных к шинам потребителя, за счет чего последние переходят из «пассивных» в «активных» участников энергетической системы.

Для сохранения напряжения в заданных лимитах применяются устройства регулирования реактивной мощности [4, 5].

Самыми простыми и распространенными источниками реактивной мощности являются батареи статических конденсаторов (БСК).

БСК в основном устанавливаются для обеспечения емкостной реактивной компенсации – коррекции коэффициента мощности. Использование БСК увеличилось, поскольку они относительно недороги, легко и быстро устанавливаются и могут быть развернуты практически в любой точке сети.

Их установка оказывает и другие положительные эффекты на систему: повышение напряжения на нагрузке, лучшее регулирование напряжения (если они были надлежащим образом спроектированы), уменьшение потерь и сокращение или отсрочка инвестиций в передачу.

Основным недостатком БСК является то, что их выходная реактивная мощность пропорциональна квадрату напряжения, и, следовательно, когда напряжение низкое и система нуждается в них больше всего, они являются наименее эффективными.

Конденсаторы предназначены для работы при их номинальном напряжении и частоте или ниже, поскольку они очень чувствительны к изменению этих значений; реактивная мощность, создаваемая конденсатором, пропорциональна как напряжению, так и частоте ( $kVA_r = 2\pi f v^2$ ).

БСК являются достаточно надежным и экономичным средством, однако при

наличии быстро изменяющихся реактивных нагрузок применение БСК неэффективно ввиду их малого быстродействия.

Следующей ступенью развития регулирующих устройств является технология гибких линий электропередач переменного тока (FACTS), в состав которых входят устройства регулирования реактивной мощности (СТАТКОМ).

Растущие возможности силовых электронных компонентов инициировали использование устройств FACTS [6, 7, 8]. Более высокие уровни мощности стали доступны в конвертерах для самых высоких напряжений. Это сетевые элементы, влияющие на импеданс или реактивную мощность в отдельных частях энергосистемы. Для устройств FACTS это объясняется двумя причинами. Одно из условий – динамическая устойчивость, которая служит для обеспечения быстрой управляемости устройств FACTS на базе силовой электроники. Это один из основных факторов отличия от обычных устройств. Другое условие – статическая устойчивость, которая обеспечивает выполнение необходимой управляемости при малых изменениях параметров режима, поскольку FACTS не имеет движущихся частей, таких как механические переключатели.

Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ) – это устройство, работающее как статический преобразователь реактивной мощности, чей емкостный или индуктивный ток может регулироваться независимо от изменения напряжения сети [6].

СТАТКОМ в основном включают последовательно или как шунтирующее устройство.

Устройства последовательного включения разработаны с механической или фиксированной коммутируемой компенсацией:

- статический синхронный компенсатор (SSSC);
- конденсатор с тиристорным коммутатором (TSSC);
- реактор с тиристорным коммутатором (TSSR);
- конденсатор с тиристорным управлением (TCSC);
- реактор с тиристорным управлением (TCSR).

Шунтирующие устройства работают как компенсаторы реактивной мощности и используются в системах передачи и распределения [9, 10, 11]:

- статический синхронный компенсатор (STATCOM);
- статический компенсатор SVC;
- реактор с тиристорным переключением (TSR);
- тиристорный коммутируемый конденсатор (TSC);
- реактор с тиристорным управлением (TCR);
- механически коммутируемый конденсатор (MSC).

STATCOM – это контролируемый источник реактивной мощности. Характеристика STATCOM аналогична характеристикам синхронного конденсатора, но в качестве электронного устройства он не имеет инерции и лучше синхронного конденсатора, поскольку имеет более низкие эксплуатационные расходы и инвестиционные затраты, лучшую динамику.

Статическая характеристика имеет определенную крутизну между текущими ограничениями (рис. 1), определяющими управляющую кривую напряжения. В распределенной энергетической системе обычно используется преобразователь источника напряжения для межсетевое взаимодействие. Следующим шагом в разработке STATCOM является сочетание с накопителями энергии на стороне постоянного тока. Производительность для сбалансированного функционирова-

ния сети и качества электроэнергии может быть значительно улучшена благодаря сочетанию активной и реактивной мощности.

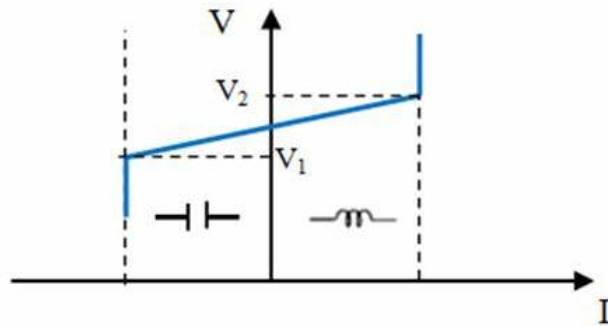


Рис. 1. VI-характеристики STATCOM

СТАТКОМ состоит из следующих элементов (рис. 2):

1. Статический преобразователь, предназначенный для работы в различных режимах потребления и генерации активной и реактивной мощности.
2. Согласующий трансформатор для подключения к шинам высокого напряжения.
3. Звено постоянного тока, которое обеспечивает напряжения.
4. Пассивный фильтр для обеспечения синусоидальности фазных токов.

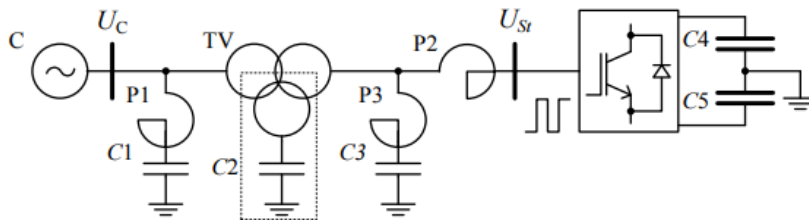


Рис. 2. Упрощенная схема СТАТКОМ

Результаты ряда исследований позволяют заключить, что на данный момент СТАТКОМ – наиболее совершенное устройство компенсации реактивной мощности.

Преимущества СТАТКОМ:

- многофункциональность;
- быстродействие;
- малое содержание высших гармоник;
- малые габариты.

СТАТКОМ обладает много меньшей вероятностью появления перенапряжений, а при уменьшении напряжения может работать в режиме стабильного источника постоянного тока [12–17]. Еще одним плюсом СТАТКОМ является возможность регулирования емкостного тока при снижении напряжения источника, что обеспечит увеличение динамической устойчивости системы по сравнению с СТК.



## **Мультиагентное регулирование напряжения в распределительных сетях и сравнение его с централизованным регулированием**

Для любых систем регулирования общей задачей является достижение целей регулирования. Для централизованного – это сведение потерь активной мощности в распределительных сетях к минимуму или увеличение пропускной способности распределительной сети при поддержании уровня напряжения в допустимом пределе с минимальными отклонениями напряжения узлов сети от номинального. Для мультиагентного – это достижение индивидуальных целей участников процесса регулирования при поддержании напряжений в допустимых пределах.

При децентрализованном (мультиагентном) регулировании напряжения уставки регулирующих устройств определяются локальными регуляторами в режиме реального времени на основании данных режима того района, в котором производится регулирование напряжения [18].

Для воплощения централизованно-распределенного принципа алгоритмы управления согласуются так, чтобы между централизованным и децентрализованными устройствами системы регулирования происходил постоянный обмен информацией, но в случае нарушения связи децентрализованная система выполняла функции управления по собственным алгоритмам.

Работа регулятора напряжения и реактивной мощности основана на следующих принципах:

1. Подстанция представляется в виде эквивалентного объекта с одним входом (суммарная реактивная мощность ИРМ, установленных на подстанции) и одним выходом (напряжение на шинах регулируемого объекта).
2. Применяется пропорционально-интегральный закон для задания реактивной мощности компенсаторов, установленных на подстанции.
3. Рассчитывается управляющее воздействие на управляемые системы компенсации реактивной мощности и устройства РПН трансформаторов.
4. Параметры регулятора могут адаптироваться в зависимости от режимно-топологических параметров сети в режиме реального времени.

Сложность создания децентрализованной системы регулирования напряжения заключается в формировании единого информационного пространства, включающего высокотехнологичные системы мониторинга за системными параметрами, устройства связи и обработки информации, программные комплексы и вычислительное оборудование.

Мультиагентное автоматическое регулирование напряжения в режиме реального времени – это такое регулирование, реализация которого возможна только в высокоавтоматизированных сетях с применением моделирования режима и минимизации потерь активной мощности в сети, поэтому оно считается самым эффективным регулированием.

## **Оптимизация уровня напряжения участка энергетической системы за счет управления потоками реактивной мощности**

Для повышения эффективности работы энергосистемы, снижения потерь активной мощности и выравнивания уровня напряжения производится оптимизация режимов по реактивной мощности. Целью оптимизации является определение мест установки компенсирующих устройств и их мощности для достижения наибольшего эффекта в снижении потерь активной мощности и выравнивании уровней напряжения в узлах сети [19].

Рассматривая энергосистему как структуру от производства электроэнергии до ее потребления, задачу распределения потоков реактивной мощности нужно решать в следующих аспектах:

- оптимальное распределение реактивной мощности между источниками питания;
- оптимальное распределение реактивной мощности внутри распределительной сети;
- регулирование напряжения в сети.

Ограничениями выступают нормативная документация, соответствующие приказы и распоряжения РАО «ЕЭС России» и Министерства промышленности и энергетики РФ.

Сущность регулирования напряжения за счет воздействия на потоки реактивной мощности по элементам электрической сети заключается в том, что при изменении реактивной мощности изменяются потери напряжения в реактивных сопротивлениях.

Продольная составляющая падения напряжения:

$$\Delta U = \frac{PR + (Q \pm Q_{ку})X}{U_2}, \quad (1)$$

- где  $P, Q$  – активная и реактивная мощности на шинах потребителя;  
 $R, X$  – активное и реактивное сопротивление системы от источника питания до шин потребителя;  
 $U_2$  – напряжение на шинах потребителя;  
 $Q_{ку}$  – мощность компенсирующего устройства [20].

Степень воздействия на сеть зависит от места установки компенсирующих устройств (КУ) и их мощности.

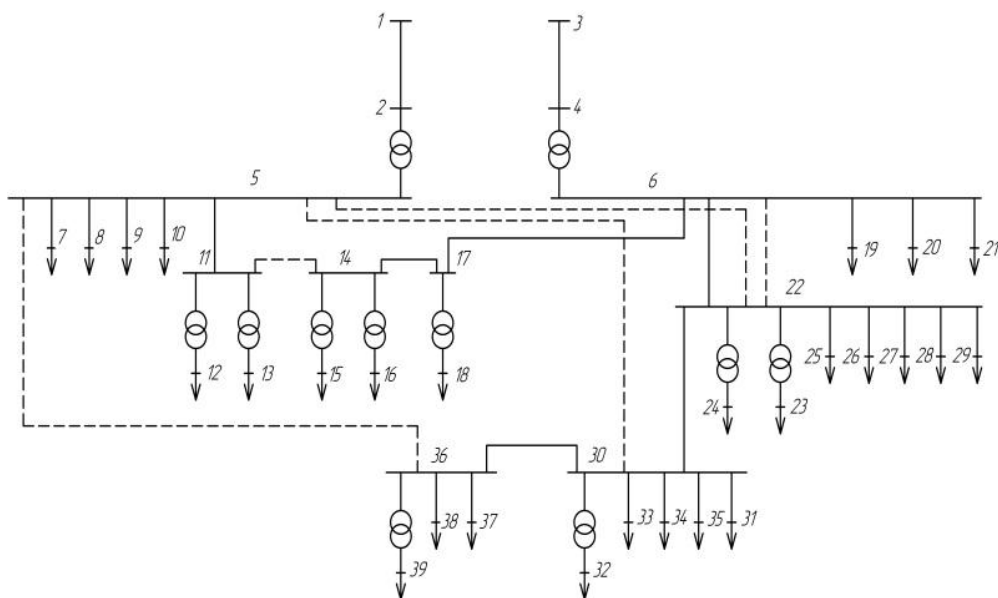


Рис. 3. Схема ПС 35/10 кВ «Водозабор» НПЗ

Целевая функция имеет следующий вид:

$$Ц = f(Q_{ку}; N_{ку}), \quad (2)$$

где  $Q_{ку}$  – мощность компенсирующего устройства;  $N_{ку}$  – узел, в котором располагается компенсирующее устройство.

В качестве расчетной схемы была выбрана двухтрансформаторная подстанция ЦРП «Водозабор» 35/10 кВ (рис. 3). Схема содержит 39 узлов, 39 линий, из которых в нормальном режиме работают 34, два независимых источника питания, 18 нагрузок на стороне 10 кВ, из них 10 двигателей мощностью более 500 кВт, и 9 нагрузок на стороне 0,4 кВ.

Результаты расчетов базового режима (рис. 4, 5) показали, что наибольшее падение напряжения, максимальные потери мощности и максимальная токовая загрузка линий будут в узлах 6, 22, 30. Также для узлов 14–39 падение напряжение превышает допустимые 5 % от  $U_{ном}$ . Для улучшения этих параметров были рассмотрены различные варианты установки компенсаторов реактивной мощности (БСК) различной мощности в различных узлах.

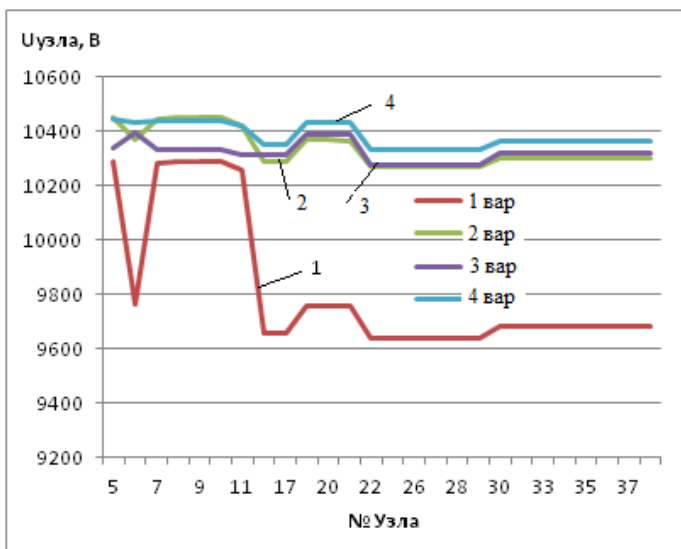


Рис. 4. Уровни напряжения в узлах на стороне 10 кВ

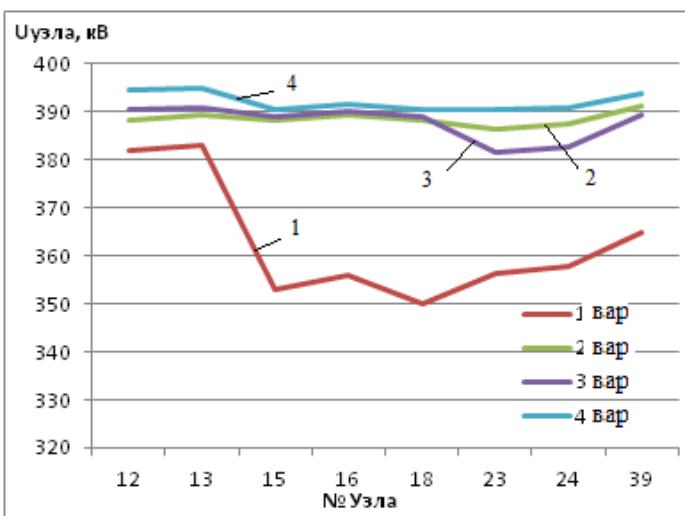


Рис. 5. Уровни напряжения в узлах на стороне 0,4 кВ

### Мощность и номер узла БСК для вариантов компенсации

№ вар.	Рабочий режим	Место установки U = 10 кВ	Место установки U = 0,4 кВ
1	Базовый режим	Без БСК	Без БСК
22	БСК 1350 кВар БСК 150 кВар БСК 300 кВар БСК 250 кВар БСК 375 кВар БСК 900 кВар БСК 600 кВар	5, 6 14, 23, 24, 32 15 16 18 22 30	5, 6 14, 23, 24, 32 15 16 18 22 30
33	БСК 4050 кВар БСК 200 кВар БСК 180 кВар БСК 300 кВар БСК 250 кВар БСК 375 кВар	12 6 13 15 16 18	6 12 13 15 16 18
44	БСК 3150 кВар БСК 900 кВар БСК 200 кВар БСК 180 кВар БСК 300 кВар БСК 250 кВар БСК 375 кВар БСК 600 кВар	6 5 12, 23 13, 24 15 16 18 22	6 5 12, 23 13, 24 15 16 18 22

#### Вывод

Анализ результатов показал, что при использовании активно-адаптивных элементов:

1. Обеспечивается частичная или полная компенсация негативного воздействия при увеличении нормативных значений отклонения и колебания напряжения, продолжительных провалов напряжения.

2. Увеличивается пропускная способность линий электропередач. Оптимизация пропускной способности ЛЭП обеспечивает возможность поставки дополнительной электроэнергии из смежных систем, а также увеличивает выдачу активных генерирующих мощностей при увеличении максимально допустимых перетоков мощности.

3. Повышается управляемость режимов работы ЭЭС. Включение в состав электроэнергетической системы устройств FACTS способно повысить управляемость работы ЭЭС, перевести потоки активной мощности в линии с более высоким классом напряжения и увеличить степень компенсации зарядной мощности электрической сети.

4. Компенсирующие устройства, установленные в расчетной схеме для поддержания уровней напряжения в допустимых пределах, являются активно-адаптивными элементами и могут быть использованы для создания интеллектуальной сети.

Мультиагентное регулирование обеспечивает эффективное регулирование напряжения в рамках интересов всех субъектов, участвующих в процессе: распределительных компаний, потребителей, распределенной генерации, а также

создает технологическую основу местных рынков услуг по регулированию напряжения в сети.

На сегодняшний день интеллектуальные сети в России находятся на начальном этапе своего развития. На данный момент отечественные энергосистемы практически не развиваются, что способствует их физическому и моральному износу. В связи с этим актуальным становится вопрос развития в нашей стране сетей совершенно иного уровня, в основу которых будут положены передовые достижения современных технологий мировой науки и техники.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Направления развития системы регулирования напряжения и реактивной мощности в ЕНЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eerp.ru/>
2. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru/>
3. *Савина Н.В.* Управление уровнем потерь электроэнергии в активно-адаптивных электрических сетях: учеб. пособие. – Благовещенск: АмГУ, 2014. – 114 с.
4. *Panagis N. Vovos, Aristides E. Kiprais, A. Robin Wallace, and Gareth P. Harrison.* Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 476–483, February 2007.
5. *Kulmala A.* 2014. Active Voltage Control in Distribution Networks Including Distributed Energy Resources, PhD dissertation, Tampere University of Technology.
6. *Bindeshwar S.* Introduction to FACTS controllers. A critical review / S. Bindeshwar, K. Verma and others // International journal of reviews in computing. – 2011. – Vol. 8. – p. 17–34.
7. *Ghahremani E., Kamwa I.* Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface. IEEE Trans. Power Syst. 2013, 28 (2), 764–778.
8. *Ghasemi A., Valipour K., Tohidi A.* Multi objective optimal reactive power dispatch using a new multi objective strategy. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2014, 57, 318–334.
9. *Palma-Behnke R., Vargas L.S., Perez J.R., Nunez J.D., Torres R.A.* OPF with SVC and UPFC modeling for longitudinal systems. IEEE Trans. Power Syst. 19 (4), 2004, 1742–1753.
10. *Sebaa K., Bouhedda M., Tlemc ani A., Henini N.* Location and tuning of TCPSTs and SVCs based on optimal power flow and an improved cross-entropy approach. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 54, 2014, 536–545.
11. *Sirjani R., Mohamed A., Shareef H.* Optimal allocation of shunt Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 43 (1), 2012, 562–572.
12. *Sundar K.S., Ravikumar H.M.* 2012. Selection of TCSC location for secured optimal power flow under normal and network contingencies. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 34 (1), 29–37.
13. *Saravanan M., Mary Raja Slochanal S., Venkatesh P., Abraham J.P.S.* Application of particle swarm optimization technique for optimal location of FACTS devices considering cost of installation and system loadability. Electrical Power System Research 77: 276–283 (2007).
14. *Mondal D., Chakrabarti A., Sengupta A.* Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 42(1): 334–340 (2012).
15. *Mohamed Idris R., Khairuddin A., Mustafa M.W.* Optimal allocation of FACTS devices for ATC enhancement using Bees algorithm. World Academy of science Engineering and Technology 3: 313–320 (2009).
16. *Panda S., Padhy N.P.* Optimal location and controller design of STATCOM for power system stability improvement using PSO, J Franklin Institute, 2008, Vol. 345, No. 2, pp. 166–181.
17. *Bian X.Y., Tse C.T., Zhang J.F., Wang K.W.* Coordinated design of probabilistic PSS and SVC damping controllers, Int J Electr Power Energy Syst, 2011, Vol. 33, No. 3, pp. 445–452.
18. *Gelen A., Yalcinoz T.* Experimental studies of a scaled-down TSR-based SVC and TCR-based SVC prototype for voltage regulation and compensation, Turk J Elec Eng & Comp Sci, 2010, Vol. 18, No. 2, pp. 147–157.
19. *Hari N., Vijayakumar K., and S.S. Dash.* A versatile control scheme for UPQC for power quality improvement, in Proc. Emerging Trends Electr. Comput. Technol., Mar. 23–24, 2011, pp. 453–458.

20. Srinath S., Selvan M.P., and Vinothkumar K. Comparative performance of different control strategies on UPQC connected valuation of distribution system, in Proc. Int. Conf. Ind. Inf. Syst., Jul. 29–Aug. 1, 2010, pp. 502–507.

*Статья поступила в редакцию 16 июня 2018 г.*

## OPTIMIZATION OF VOLTAGE LEVELS IN ACTIVE-ADAPTIVE NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION

*Y.P. Kubarkov, I.S. Kulaev, R.A. Alekhin*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *Despite the advantages of renewable distributed energy, an increase in its volume leads to serious changes in the characteristics of the electrical network. This is especially noticeable in low and medium voltage networks. To date, the main method of voltage regulation in Russia is to maintain specified voltage levels at control points of the distribution network. The existing centralized system for regulating the operating parameters does not ensure the effectiveness of voltage control in networks. An alternative to the traditional method of voltage regulation is an intelligent power system with an actively-adaptive electrical network. The effectiveness of multi-agent regulation is higher than that of traditional methods of voltage regulation in distribution networks, this is due to system adaptability and real-time operation. The introduction of an intelligent adaptive voltage regulation system reduces power losses, improves the quality of supply to consumers, increases the reliability of the system and its level of throughput.*

**Keywords:** *active-adaptive network, multi-agent voltage regulation, reactive power source, intelligent electrical system.*

### REFERENCES

1. Directions for the development of voltage regulation and reactive power in the UNEG [Electronic resource] Access mode: <http://eepr.ru/>.
2. The main provisions of the concept of an intelligent power system with an actively-adaptive network [Electronic resource] Access mode: <http://www.fsk-ees.ru/>.
3. Savina N.V. Controlling the level of electricity losses in active-adaptive electrical networks: a textbook / N.V. Savina. – Blagoveshchensk: AmSU, 2014. – 114 p.
4. Panagis N. Vovos, Aristides E. Kiprais, A. Robin Wallace, and Gareth P. Harrison, "Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 476–483, February 2007.
5. Kulmala A. 2014. Active Voltage Control in Distribution Networks Including Distributed Energy Resources, PhD dissertation, Tampere University of Technology.
6. Bindeshwar S. Introduction to FACTS controllers. A critical review / S. Bindeshwar, K. Verma and others // International journal of reviews in computing. – 2011. – Vol. 8. – p. 17–34.
7. Ghahremani E., Kamwa I. Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface. IEEE Trans. Power Syst. 2013, 28 (2), 764–778.
8. Ghasemi A., Valipour K., Tohidi A. Multi objective optimal reactive power dispatch using a new multi objective strategy. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2014, 57, 318–334.
9. Palma-Behnke R., Vargas L.S., Perez J.R., Nunez J.D., Torres R.A. OPF with SVC and UPFC modeling for longitudinal systems. IEEE Trans. Power Syst. 19 (4), 2004, 1742–1753.
10. Sebaa K., Bouhedda M., Tlemc ani A., Henini N. Location and tuning of TCPSTs and SVCs based

---

*Youry P. Kubarkov (Doc. of Techn. Scien.), Professor.  
Igor S. Kulayev, Student.  
Roman A. Alekhin, Postgraduate student.*

- on optimal power flow and an improved cross-entropy approach. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 54, 2014, 536–545.
11. Sirjani R., Mohamed A., Shareef H. Optimal allocation of shunt Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 43 (1), 2012, 562–572.
  12. Sundar K.S., Ravikumar H.M. 2012. Selection of TCSC location for secured optimal power flow under normal and network contingencies. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 34 (1), 29–37.
  13. Saravanan M., Mary Raja Slochanal S., Venkatesh P., Abraham J.P.S. Application of particle swarm optimization technique for optimal location of FACTS devices considering cost of installation and system loadability. *Electrical Power System Research* 77: 276-283 (2007).
  14. Mondal D., Chakrabarti A., Sengupta A. Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 42(1): 334-340 (2012).
  15. Mohamed Idris R., Khairuddin A., Mustafa M.W. Optimal allocation of FACTS devices for ATC enhancement using Bees algorithm. *World Academy of science Engineering and Technology* 3: 313–320 (2009).
  16. Panda S., Padhy N.P. Optimal location and controller design of STATCOM for power system stability improvement using PSO, *J Franklin Institute*, 2008, Vol. 345, No. 2, pp. 166–181.
  17. Bian X.Y., Tse C.T., Zhang J.F., Wang K.W. Coordinated design of probabilistic PSS and SVC damping controllers, *Int J Electr Power Energy Syst*, 2011, Vol. 33, No. 3, pp. 445–452.
  18. Gelen A., Yalcinoz T. Experimental studies of a scaled-down TSR-based SVC and TCR-based SVC prototype for voltage regulation and compensation, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 2010, Vol. 18, No. 2, pp. 147–157.
  19. Hari N., Vijayakumar K., and Dash S.S. A versatile control scheme for UPQC for power quality improvement, in *Proc. Emerging Trends Electr. Comput. Technol.*, Mar. 23–24, 2011, pp. 453–458.
  20. Srinath S., Selvan M.P., and Vinothkumar K. Comparative performance of different control strategies on UPQC connected valuation of distribution system, in *Proc. Int. Conf. Ind. Inf. Syst.*, Jul. 29–Aug. 1, 2010, pp. 502–507.

УДК 621.311

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА РЕГУЛИРОВАНИЯ ФАЗОСДВИГАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ЗАДАНИИ ФИКСИРОВАННОГО ПЕРЕТОКА МОЩНОСТИ ПО ВЕТВИ

**С.В. Локтионов**

Национальный исследовательский университет (МЭИ)  
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

***Аннотация.** Фазосдвигающий трансформатор (ФСТ) служит для принудительного перераспределения потоков активной мощности в контуре с целью снижения ее потерь, а также для изменения потока мощности по ветвям контура в коммерческих или иных целях. Ранее был предложен алгоритм, позволяющий определять наилучшее место его установки в контуре по критерию минимальных потерь активной мощности и угол регулирования аналитическим путем, избегая метода перебора. При выводе формулы расчета угла использовались уравнения баланса мощности в узле. В данной статье рассматривается алгоритм расчета угла регулирования ФСТ для обеспечения нужного потока активной мощности в одной из ветвей контура с применением данного подхода. Рассмотрены примеры применения алгоритма расчета угла на различных видах схем, показана возможность рассмотрения фрагментов схем для упрощения расчетов, а не всей схемы, состоящей из большого количества узлов и ветвей.*

***Ключевые слова:** рынок электроэнергии, управляемые системы электропередачи, фазосдвигающий трансформатор, расчет угла регулирования, управление перетоками мощности.*

### **Введение**

В мировой и отечественной литературе последние несколько лет уделяется повышенное внимание проблеме управляемости электроэнергетических систем за счет применения специальных технических средств воздействия на ее режим. С одной стороны, это обусловлено введением рыночных отношений в электроэнергетике и децентрализацией управления ряда энергообъединений, требующей повышения гибкости их работы, а с другой – появлением нового класса регулирующих устройств, базирующихся на применении силовой электроники (FACTS). Электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей. Большой интерес к перспективам применения устройств FACTS в Единой энергосистеме России (ЕЭС) обусловлен наличием таких проблем, как недостаточная пропускная способность системообразующих электрических сетей, слабая управляемость сетей и недостаточный объем устройств регулирования напряжения и реактивной мощности, неоптимальное распределение потоков мощности по линиям электропередачи разного класса напряжения. Одним из известных и применяемых элементов, относящихся к FACTS-оборудованию, является ФСТ [1]. Это устройство, позволяющее осуществить преднамеренное поперечное регулирование напряжения, в результате



чего изменяется угол между векторами напряжений по концам электропередачи (в которую включен ФСТ) и, как следствие, происходит желаемое изменение мощности, передаваемой по этой электропередаче, вне зависимости от параметров шунтирующих связей. ФСТ может применяться для снижения потерь активной мощности, обусловленных неоднородностью электрической сети, а также для обеспечения заданного потока мощности в одной из ветвей контура. Также изучалась возможность создания гибких линий электропередачи на основе комплексного применения ФСТ с продольной емкостной компенсацией реактивного сопротивления ФСТ для снижения потерь активной мощности и повышения пропускной способности контура [2]. Применение ФСТ для снижения потерь мощности и поиск оптимального места его установки в электрической сети рассматривались как в зарубежных работах, так и работах ученых стран СНГ, в частности много внимания этому уделялось в исследованиях Института электроэнергетики (АН Молдовы) [3].

Для поиска оптимального места установки ФСТ в схеме использовались различные подходы, например изложенные в [4–9]. Каждый из них имел свои достоинства и недостатки [10]. Однако общим слабым местом всех подходов являлся тот факт, что после нахождения оптимального места установки ФСТ в контуре тем или иным способом величину угла регулирования, а также его знак (положительный или отрицательный) для каждого режима требовалось определять методом перебора. Вывести аналитическую формулу определения оптимального угла регулирования ФСТ, а также преодолеть недостатки иных предлагаемых подходов к решению задачи выбора наилучшего места установки ФСТ в контуре удалось с помощью принципа существования баланса мощности в узле в любой момент времени. Предложенный в [10] алгоритм позволял по параметрам схемы и исходного режима электроэнергетической системы с учетом параметров ФСТ для каждой из рассматриваемых ветвей определить безытерационно оптимальное значение угла регулирования  $\theta^{\text{опт}}$  и соответствующее значение суммарных потерь активной мощности в схеме.

Кроме того, что ФСТ может перераспределять потоки активной мощности с целью снижения суммарных потерь, ФСТ способен решать и другие задачи, например для принудительного перераспределения трансграничных потоков мощности в контуре с целью избежать значительной платы или запрета на транзит по территории другого государства или по линиям, принадлежащим другому собственнику [11]. Особенно это стало актуальным сегодня в свете либерализации рынка электроэнергии. Первый установленный ФСТ в СНГ (Казахстан) был предназначен именно для снижения загрузки линии 220 кВ, проходящей через территорию России, с целью обойти запрет на транзит мощности [12]. ФСТ помогает перенаправлять потоки мощности от производителя к потребителю в рыночных условиях по заранее заданному маршруту, обходя узкие места. ФСТ также способен увеличивать загрузку воздушной линии для борьбы с гололедом. Первый собранный в СССР в 1991 году, но не установленный ФСТ предназначался для плавки гололеда в Одесской области. В специализированной технической литературе была информация о планах установки в конце второго десятилетия нашего века в России в районе Омска быстродействующего тиристорно-управляемого ФСТ. Для управления быстродействующим ФСТ и решения вопросов динамической устойчивости потребуются алгоритмы управления, возникнет необходимость их программирования и метод перебора для поиска угла регулирования будет неприемлем. Таким образом, встает вопрос о получении

расчетной формулы нахождения угла регулирования. Аналитический расчет угла регулирования для обеспечения необходимого значения перетока активной мощности в выбранной ветви контура может быть получен на основе аналогичного подхода, изложенного в [10].

### Вывод расчетных выражений

При разработке алгоритма, изложенного в [10], принимались следующие допущения:

1. ФСТ вводится в схему замещения в виде постоянного продольного сопротивления  $Z_f = R_f + jX_f$  с комплексным коэффициентом трансформации; создаваемый с помощью ФСТ фазовый сдвиг в контуре обозначается углом регулирования  $\theta$ .

2. При включении ФСТ в схему и изменении угла регулирования от  $\theta=0^\circ$  до другого значения модули напряжений в узлах сети будут постоянными и равными значениям напряжений в исходном режиме без ФСТ или при  $\theta=0^\circ$  в зависимости от условий задачи.

Рассмотрим вывод алгоритма нахождения угла регулирования ФСТ для обеспечения необходимого значения перетока мощности в одной из ветвей контура электрической сети с использованием вышеперечисленных допущений. Для любой ветви с параметрами  $R, X$  можно записать выражения для активной мощности начала и конца ветви (рис. 1):

$$P = U_1^2 y \sin \alpha + U_1 U_2 y \sin(\delta - \alpha); \quad (1)$$

$$P' = -U_2^2 y \sin \alpha + U_1 U_2 y \sin(\delta + \alpha), \quad (2)$$

где  $y = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}$ ;  $\alpha = \arctg \frac{R}{X}$ ;

$U_1, U_2$  – модули напряжения в начале и конце ветви соответственно;

$\delta$  – угол между векторами напряжения  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ .

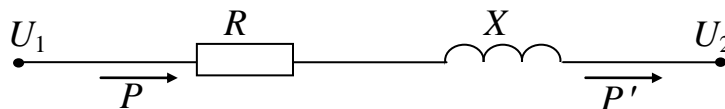


Рис. 1. Мощности в начале и конце ветви

На базе выражений (1), (2) был построен алгоритм и выведена формула расчета угла регулирования по критерию минимальных потерь активной мощности (первый алгоритм) [10]. Получив значения минимальных потерь активной мощности от установки ФСТ в разных ветвях контура, затем определяли наилучшую ветвь для его установки. При решении другой задачи, обеспечения необходимого перетока мощности по заданной ветви контура, также необходимо получить аналитическое выражение для расчета величины угла ФСТ, который надо установить для достижения намеченной цели.

Для решения этой практической задачи можно применить уже апробированный подход, в основе которого лежит существование баланса мощности в узле в любой момент времени. При получении аналитических выражений для расчета угла регулирования ФСТ будем опираться на расчеты и выводы, полученные ранее в [10] для первого алгоритма (определение угла регулирования по критерию минимальных потерь активной мощности).

Считаем, что ФСТ уже установлен в одной из ветвей контура и допустим по

критерию минимальных потерь активной мощности. Пусть какой-либо узел  $m$  многоконтурной схемы электрической сети связан с несколькими ветвями, по которым «приходит» к данному узлу или «отходит» от узла активная мощность. В любой момент времени в узле сохраняется баланс мощности – это значит, что изменение мощности в какой-либо ветви схемы приводит к изменению мощности в остальных ветвях. При этом сумма изменений мощностей в ветвях, связанных с данным узлом  $m$ , равна нулю. При записи уравнений баланса мощности примем следующие обозначения. Ветвь, соединяющая узлы  $m$  и  $k$ , обозначается как  $mk$ . Параметрам режима с включенным в ветвь  $mk$  ФСТ с углом регулирования  $\theta_{mk} = 0$  присвоим индекс  $0$ , при этом проводимости  $y_{mk}$  и углу  $\alpha_{mk}$  ветви с ФСТ присвоим индекс  $f$ . Остальные ветви, связанные с узлом  $m$ , обозначим как  $l$ .

В [10] было показано, что ФСТ не только изменяет параметры режима своим углом регулирования, но также за счет своего значительного реактивного сопротивления перераспределяет потоки мощности по ветвям, действуя при этом как продольный реактор. Однако в случае решения нашей задачи считается, что ФСТ уже установлен. Это значит, что он вводится согласно принятым допущениям постоянным сопротивлением, при этом его сопротивление уже было просуммировано с сопротивлением ветви, в которой он находится. Таким образом, его сопротивление уже учитывается в расчете исходного установившегося режима и не влияет самостоятельно на последующее перераспределение мощности в контуре в качестве реактора. Поэтому остается только найти угол регулирования для обеспечения заданного перетока мощности в конкретной ветви контура.

В общем виде уравнение баланса активной мощности в узле  $m$ , составленное по принципу «было (до регулирования углом) – стало (после регулирования углом)», взятое из [10], имеет вид

$$\begin{aligned} & -U_m^2 y_{mkf} \sin \alpha_{mkf} \mp U_m U_k y_{mkf} \sin(\delta_{mk}^0 \mp \alpha_{mkf}) + U_m^2 y_{mkf} \sin \alpha_{mkf} \pm \\ & \pm U_m U_k y_{mkf} \sin(\delta_{mk}^0 \mp \alpha_{mkf} + \Delta \delta_{mk} + \theta_{mk}) - U_m^2 \sum_l y_{ml} \sin \alpha_{ml} + \\ & + U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml})] + U_m^2 \sum_l y_{ml} \sin \alpha_{ml} - \\ & - U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml} + \Delta \delta_{ml})] = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь для отходящей от узла  $m$  мощности используется выражение (1), а для приходящей мощности – выражение (2).

Если надо обеспечить фиксированный переток активной мощности  $P^{fix}$  по ветви  $mn$ , связанной с узлом  $m$ , в которой не стоит ФСТ, то выражение (3) примет вид

$$\begin{aligned} & -U_m^2 y_{mkf} \sin \alpha_{mkf} \mp U_m U_k y_{mkf} \sin(\delta_{mk}^0 \mp \alpha_{mkf}) + U_m^2 y_{mkf} \sin \alpha_{mkf} \pm \\ & \pm U_m U_k y_{mkf} \sin(\delta_{mk}^0 \mp \alpha_{mkf} + \Delta \delta_{mk} + \theta_{mk}) - U_m^2 y_{mn} \sin \alpha_{mn} \mp \\ & \mp U_m U_n y_{mn} \sin(\delta_{mn}^0 \mp \alpha_{mn}) \pm P^{fix} - U_m^2 \sum_l (y_{ml} \sin \alpha_{ml}) + \\ & + U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml})] + U_m^2 \sum_l y_{ml} \sin \alpha_{ml} - \\ & - U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml} + \Delta \delta_{ml})] = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Если переток активной мощности задан в ветви, содержащей ФСТ, тогда выражение примет вид

$$\begin{aligned}
& -U_m^2 y_{mkf} \sin \alpha_{mkf} \mp U_m U_k y_{mkf} \sin(\delta_{mk}^0 \mp \alpha_{mkf}) \pm P_{mnf}^{fix} - \\
& -U_m^2 \sum_l y_{ml} \sin \alpha_{ml} + U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml})] + \\
& + U_m^2 \sum_l y_{ml} \sin \alpha_{ml} - U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml} + \Delta\delta_{ml})] = 0, \quad (5)
\end{aligned}$$

где для выражений (3)–(5)  $l$  – множество номеров узлов, непосредственно связанных с узлом  $m$  линиями или трансформаторами;  $l \neq n$ ; верхний знак («+» или «–») соответствует отходящей от узла  $m$  мощности, а нижний знак соответствует приходящей к узлу мощности; если ветвь, в которую включен ФСТ, не связана с рассматриваемым узлом  $m$ , в выражении следует принять  $y_{mkf} = 0$ ;

$P_{mnf}^{fix}$  – требуемый переток активной мощности по линии;

$$\Delta\delta_{mk} = \delta_{mk} - \delta_{mk}^0, \Delta\delta_{ml} = \delta_{ml} - \delta_{ml}^0.$$

Выражение для заданной мощности имеет вид, согласно (1) и (2),

$$P_{mn}^{fix} = \pm U_m^2 y_{mn} \sin \alpha_{mn} + U_m U_n y_{mn} \sin(\delta_{mn}^0 + \Delta\delta_{mn} \mp \alpha_{mn}), \quad (6)$$

где верхний знак («+» или «–») соответствует отходящей от узла  $m$  мощности, а нижний знак соответствует приходящей к узлу мощности.

При дальнейшем выводе уравнений для расчета оптимального угла регулирования ФСТ по критерию минимальных потерь полагали, что  $\sin \Delta\delta_{mk} \approx \Delta\delta_{mk}$ ,  $\cos \Delta\delta_{mk} \approx 1$ ,  $\sin \Delta\delta_{ml} \approx \Delta\delta_{ml}$ ,  $\cos \Delta\delta_{ml} \approx 1$  и решали линеаризованные в точке исходного установившегося режима уравнения, в которых приращения взаимных углов  $\Delta\delta_{mk}$  и  $\Delta\delta_{ml}$  выступали как неизвестные. Регулирование режима с помощью ФСТ означает фактическое снижение неоднородности сети путем введения дополнительного угла, который принудительно уравнивает углы наклона X/R разных ветвей [13, 14]. Это не требует введения значительного угла в контур сети, поэтому линеаризация всех уравнений не вносит серьезных погрешностей в вычисления. В нашем случае применяется одно полное нелинеаризованное уравнение мощности (6), а линеаризация остальных уравнений системы может дать серьезную погрешность. Так как перераспределение мощности может быть значительным и ничем не ограниченным (кроме термической стойкости провода и режимных ограничений по статике), то при этом угол регулирования может иметь большое значение. Поэтому надо решать систему уравнений по полным нелинеаризованным уравнениям. Количество неизвестных, равное числу ветвей, превышает количество уравнений, равное числу  $j$  узлов без балансирующего узла ( $j = J - 1$ , где  $J$  – число узлов в схеме). Необходимо добавить недостающие уравнения – это уравнения фазового сдвига в контуре. Их количество равно числу  $H$  независимых контуров. При записи каждого дополнительного уравнения суммирование производится по ветвям, образующим контур, и ставится знак «+», если произвольно выбранное направление обхода контура совпадает с направлением активной мощности в данной ветви в исходном режиме, и знак «–», если не совпадает:

$$\sum(\pm \Delta\delta_{pq}^0) = 0, \quad (7)$$

где  $p$  и  $q$  – номера узлов по концам ветвей, входящих в рассматриваемый независимый контур ( $p \neq q$ ).

Полученная система из  $j$  уравнений вида (3)–(6) и  $H$  уравнений вида (7) решается любым известным способом.

### Примеры применения алгоритма

Рассмотрим применение разработанного алгоритма поэтапно, как это делалось в [10, 15], сначала для простейшей одноконтурной схемы без промежуточного отбора мощности (рис. 2). Значения параметров схемы и исходного режима приведены в приложении 1. Сопротивление ФСТ будет суммироваться с сопротивлением той ветви, в которую он будет установлен.

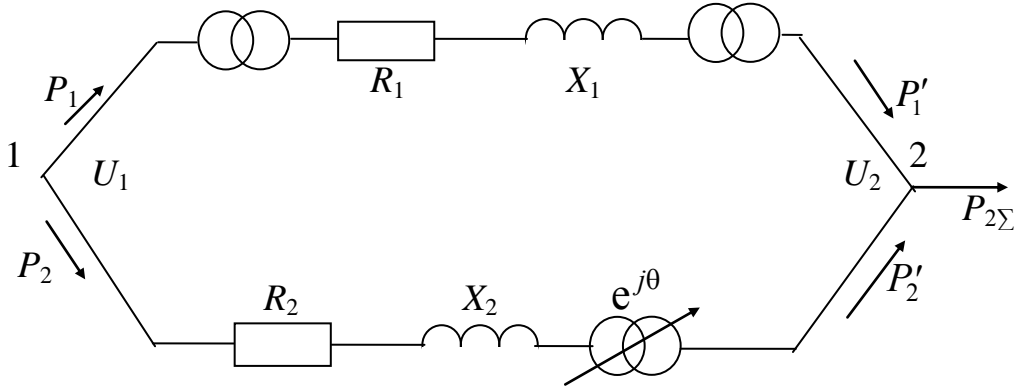


Рис. 2. Одноконтурная схема

В [10, 15] было показано, что включение ФСТ в линию 500 кВ (сопротивление  $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ ) приведет к увеличению суммарных потерь активной мощности, а также это будет существенно дороже из-за конструктивного выполнения на более высокое номинальное напряжение. Поэтому ФСТ устанавливается в ветви с номинальным напряжением 220 кВ (с сопротивлением  $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ ). В верхней ветви отсутствуют отборы мощности, поэтому последовательно соединенные трансформаторы и воздушную линию можно рассматривать как одну ветвь 1–2, присвоив ей индекс 1; нижней ветви присваивается индекс 2. Пусть в ветви 1 необходимо получить переток активной мощности, равный 900 МВт, для этого надо найти значение угла регулирования ФСТ, при котором он будет обеспечен. Считаем, что нагрузка узла 2  $P_{2\Sigma} = \text{const}$ .

Баланс активной мощности «было – стало» для узла 2 можно записать в виде

$$P_1^{\prime 0} + P_2^{\prime 0} = P_1' + P_2' = P_{2\Sigma},$$

где  $P_1^{\prime 0}, P_2^{\prime 0}$  – значения мощностей при угле регулирования ФСТ  $\theta = 0^\circ$ ;

$P_1', P_2'$  – значения мощностей при угле регулирования, обеспечивающем заданный переток активной мощности в ветви 1:

$$P_1^{\prime 0} - P_1' + P_2^{\prime 0} - P_2' = 0;$$

$$P_1^{\prime 0} - 900 + P_2^{\prime 0} - P_2' = 0.$$

Обе мощности приходят к узлу 2. Выражаем значения активных мощностей через параметры схемы и режима с помощью уравнения (2). Запишем уравнения вида (4) для узла 2:

$$\begin{aligned} & -U_2^2 y_{2f} \sin \alpha_{2f} + U_1 U_2 y_{2f} \sin(\delta^0 + \alpha_{2f}) + U_2^2 y_{2f} \sin(\alpha_{2f} - \\ & - U_1 U_2 y_{2f} \sin(\delta^0 + \Delta\delta_2 + \alpha_{2f} + \theta) - U_2^2 y_1 \sin \alpha_1 + \end{aligned}$$

$$+U_1U_2y_1 \sin(\delta^0 + \alpha_1) - P_1^{fix} = 0.$$

После преобразований получим

$$U_1y_2f \sin(\delta^0 + \alpha_{2f}) - U_1y_2f \sin(\delta^0 + \alpha_{2f} + \Delta\delta_2 + \theta) - \\ -U_2y_1 \sin \alpha_1 + U_1y_2 \sin(\delta^0 + \alpha_1) - \frac{P_1^{fix}}{U_2} = 0.$$

Уравнение содержит два неизвестных  $\Delta\delta_2$  ( $\Delta\delta_2 = \Delta\delta_1$ ) и  $\theta$ . Чтобы их найти, необходимо добавить еще одно уравнение. Добавляем уравнение мощности в ветви 1 (6):

$$P_1^{fix} = -U_2^2y_1 \sin \alpha_1 + U_1U_2y_1 \sin(\delta^0 + \Delta\delta_1 + \alpha_1).$$

Решаем оба этих уравнения и получаем значение угла регулирования ФСТ равное,  $-7,6^\circ$ , которое необходимо установить, чтобы обеспечить поток активной мощности по ветви 1, равный 900 МВт. В качестве эталонной программы для проведения сравнения и оценки вычислений системный оператор ЕЭС (СО ЕЭС) России разрешает применять программу RastrWin. Расчет методом перебора угла с помощью программы RastrWin с гарантированной малой погрешностью (точный способ) дает аналогичный результат, найденный по приведенным формулам (приближенный) (см. табл. 1)

Таблица 1

Значения угла регулирования

ФСТ в ветви	Способ расчета	$\Delta\delta_1 = \Delta\delta_2$ , град	$\theta^\circ$ , град
2	RastrWin	1,085	-7,6
	Формула	1,085	-7,66

Рассмотрим одноконтурную схему с отбором мощности на стороне 220 кВ (рис. 3). Значения параметров схемы и исходного режима приведены в приложении 2.

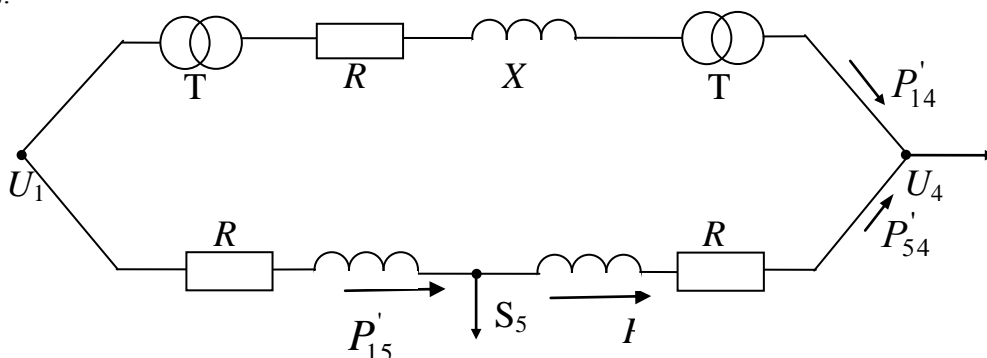


Рис. 3. Одноконтурная схема с промежуточным отбором мощности

Сопротивление ФСТ аналогично суммируется с сопротивлением той ветви, в которой он будет установлен. В данном случае это ветвь 1–5 с номинальным напряжением 220 кВ. Аналогично обозначим последовательно соединенные ветви (трансформаторы и воздушная линия) как одну ветвь 1–4. Пусть требуется

обеспечить поток активной мощности, равный 999,3 МВт, по ветви 1–4. Рассчитаем угол регулирования ФСТ, который необходимо при этом задать.

Для этого запишем уравнение баланса активной мощности в узле 5, воспользовавшись уравнением (4):

$$\begin{aligned} P'_{15}{}^0 - P'_{15} + P_{54} - P_{54}{}^0 &= 0; \\ P'_{15}{}^0 - P'_{15} + P_{54} - P_{54}{}^0 &= 0; \\ U_1 y_{15f} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15f}) - U_5 y_{15f} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15f} + \Delta\delta_{15} + \theta) - \\ - U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54}) + U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54} + \Delta\delta_{54}) &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Для узла 4 уравнения баланса мощности имеют вид

$$\begin{aligned} P'_{54}{}^0 - P'_{54} + P'_{14}{}^0 - P'_{14} &= 0; \\ P'_{54}{}^0 - P'_{54} + P'_{14}{}^0 - 999,3 &= 0; \\ -U_1 y_{14} \sin \alpha_{14} + U_1 y_{14} \sin(\delta_{14}^0 + \alpha_{14}) - \frac{P_{14}^{fix}}{U_4} + U_5 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 + \alpha_{54}) - \\ - U_1 y_{14} \sin(\delta_{54}^0 + \alpha_{54} + \Delta\delta_{54}) &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнения (8), (9) содержат четыре неизвестных:  $\Delta\delta_{15}$ ,  $\Delta\delta_{54}$ ,  $\Delta\delta_{14}$ ,  $\theta$ . Поэтому для их нахождения надо добавить еще два уравнения. Одним из уравнений будет уравнение суммы приращения взаимных углов в контуре (7), которое с учетом направлений потоков активной мощности в исходном режиме имеет вид

$$\Delta\delta_{54} + \Delta\delta_{15} - \Delta\delta_{14} = 0. \quad (10)$$

Второе уравнение – это уравнение приходящей активной мощности для ветви (6):

$$P_{14}^{fix} = -U_4^2 y_{14} \sin \alpha_{14} + U_1 U_4 y_{14} \sin(\delta_{14}^0 + \Delta\delta_{14} + \alpha_{14}). \quad (11)$$

Решение системы, состоящей из уравнений (8)–(11), даст решение относительно поиска угла ФСТ. В табл. 2 приведены значения приращений взаимных углов и угол регулирования ФСТ, рассчитанные по формулам и полученные с помощью программы RastrWin методом перебора. Значения углов практически равны.

Таблица 2

**Значения приращений взаимных углов для одноконтурной схемы**

ФСТ в ветви	Способ расчета	$\Delta\delta_{15}$ , град	$\Delta\delta_{54}$ , град	$\Delta\delta_{14}$ , град	$\theta^\circ$ , град
1–5	RastrWin	4,45	-3.08	1,46	-10,6
	Формула	4,537	-3.08	1,457	-10,26

Рассмотрим двухконтурную схему с отбором мощности в качестве следующей иллюстрации работы алгоритма. Схема, представленная на рис. 4, содержит ветви 1–3 и 3–4 с напряжением 500 кВ, ветви 1–5 и 5–4 с напряжением 220 кВ (параметры режима и схемы – см. приложение 3). ФСТ установлен в ветви 1–5 (его сопротивление просуммировано с сопротивлением ветви 1–5), являющейся оптимальным местом установки ФСТ по критерию минимальных потерь активной мощности. Данный расчет был показан в [10].

Пусть требуется обеспечить поток активной мощности по линии 1–3, равный 1405 МВт. Для этого требуется рассчитать угол регулирования, который надо установить на ФСТ. Составим систему уравнений.

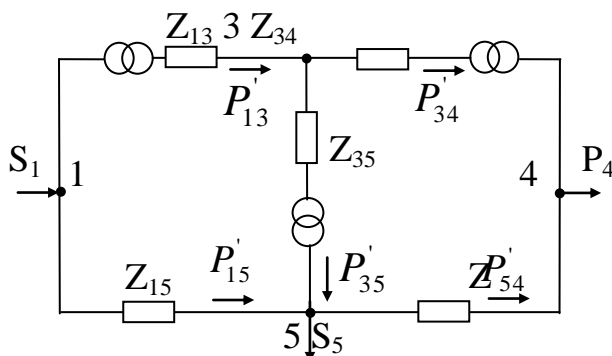


Рис. 4. Двухконтурная схема

Для узла 3 уравнение (4) имеет вид

$$-U_3 y_{34} \sin \alpha_{13} + U_1 y_{13} \sin(\delta_{13}^0 + \alpha_{13}) - \frac{P_{13}'^{fix}}{U_3} - U_4 y_{34} \sin(\delta_{34}^0 - \alpha_{34}) + \\ + U_{34} y_{34} \sin(\delta_{34}^0 - \alpha_{34} + \Delta \delta_{34}) - U_5 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 - \alpha_{35}) + U_5 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 - \\ - \alpha_{35} + \Delta \delta_{35}) = 0.$$

Для узла 5 уравнение (3) запишем

$$U_1 y_{15} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15}) - U_1 y_{15} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15} + \Delta \delta_{15} + \theta) + U_3 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 + \\ + \alpha_{35}) + U_3 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 + \alpha_{35} + \Delta \delta_{35}) - U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54}) + \\ + U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54} + \Delta \delta_{54}) = 0.$$

Для узла 4 уравнение (3)

$$U_3 y_{34} \sin(\delta_{34}^0 + \alpha_{34}) - U_3 y_{34} \sin(\delta_{34}^0 + \alpha_{34} + \Delta \delta_{34}) + U_5 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 + \\ + \alpha_{54}) - U_5 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 + \alpha_{54} + \Delta \delta_{54}) = 0.$$

Так как имеется два независимых контура, то уравнения контурного сдвига (7) записываются в виде

$$\Delta \delta_{15} - \Delta \delta_{35} - \Delta \delta_{13} = 0; \\ \Delta \delta_{54} - \delta_{34} \Delta \delta_{35} + \Delta \delta_{35} = 0.$$

Дополнительное уравнение мощности для ветви 1–3 записывается в виде

$$P_{13}'^{fix} = -U_3^2 y_{13} \sin \alpha_{13} + U_1 U_3 y_{13} \sin(\delta_{13}^0 + \Delta \delta_{13} + \alpha_{13}).$$

Решение системы уравнений дает значения неизвестных  $\Delta \delta_{15}$ ,  $\Delta \delta_{35}$ ,  $\Delta \delta_{13}$ ,  $\Delta \delta_{34}$ ,  $\Delta \delta_{54}$ ,  $\theta$ . Данные, полученные аналитическим путем и с помощью программы RastrWin методом перебора, сведены в табл. 3.



Значения приращений взаимных углов

ФСТ в ветви	Способ расчета	$\Delta\delta_{15}$ , град	$\Delta\delta_{54}$ , град	$\Delta\delta_{35}$ , град	$\Delta\delta_{13}$ , град	$\Delta\delta_{34}$ , град	$\theta^\circ$ , град
1-5	RastrWin	3,286	-0,764	0,965	2,321	0,202	-20
	Формула	3,301	-0,802	0,973	2,238	0,1711	-20,32

Как видно из табл. 3, погрешность в определении значения угла регулирования составляет 1,5 %, в абсолютных величинах 0,32°. Значения активных мощностей по ветвям контура при разных углах регулирования ФСТ, установленного в ветви 1–5, представлены в табл. 4. В таблице даны значения приходящих мощностей к узлам схемы 3, 5, 4, полученные с помощью расчетов по программе RastrWin. Из таблицы видно, что увеличение значения отрицательного угла ФСТ запирает ветвь 1–5 (220 кВ) и вытесняет поток активной мощности в линию 1–3 (500 кВ). Значения напряжений в узлах даны в табл. 5.

Таблица 4

Значения активных мощностей

$\theta^\circ$ , град	$P'_{15}$ , МВт	$P'_{54}$ , МВт	$P'_{13}$ , МВт	$P'_{34}$ , МВт	$P'_{35}$ , МВт
0	186,8	145,3	1229,6	854,7	364,3
-10	100,8	139,4	1315,4	860,6	443,9
-14	69,8	137,1	1346,4	862,9	472,5
-20	11,3	132,6	1404,9	867,4	526,2
-25	-34	128,9	1450,2	871,1	567,6

Таблица 5

Значения напряжений в узлах при различных углах регулирования

$\theta^\circ$ , град	$U_1$ , кВТ	$U_3$ , кВТ	$U_5$ , кВТ	$U_4$ , кВТ
0	220	212,94	212,24	220
-10	220	212,82	212,73	220
-14	220	212,69	212,77	220
-20	220	212,35	212,65	220
-25	220	211,98	212,39	220

Анализ значений активных мощностей из табл. 4 при изменении угла ФСТ показывает, что они сильно меняются только в самом контуре, где он установлен. Это ветви 1–5, 1–3, 3–5, а также ветвь 5–4. В ветви 1–5 поток активной мощности при угле регулирования  $-25^\circ$  меняет свое направление, но в ветви 3–4 при этом он меняется незначительно. Из табл. 5 видно, что значения напряжений в узлах 3 и 5 меняются слабо. В [15] проведенный анализ потокораспределения в многоконтурных схемах показал, что чем дальше ветвь расположена от ФСТ, тем меньше его воздействие на изменение величины активной мощности в этой ветви. Так, в [10, 15] в рассматриваемой двухконтурной схеме, представленной на рис. 4, ФСТ был установлен сначала в ветви 1–5, затем в ветви 5–4. Влияние ФСТ на изменение потока активной мощности по ветви определяется значением производной приращения взаимного угла  $\Delta\delta$  от угла регулирования ФСТ  $\theta$ . Если оно незначительно, то степень влияния ФСТ на поток активной мощности в этой

ветви мало. Знак производной указывает на степень увеличения (+) или снижения (-) передаваемой мощности по ветви. Взятые из [10] значения производных приращений взаимных углов по углу регулирования (табл. 6), которые рассчитывались для нахождения оптимального угла регулирования ( $\theta^{opt}$ ) по критерию минимальных потерь активной мощности для схемы на рис. 4, показывают, что идет уменьшение значений производных по мере удаления ветвей от места установки ФСТ.

Таблица 6

Значения производных по углу регулирования

ФСТ в ветви	$d\Delta\delta_{13}/d\theta$	$d\Delta\delta_{15}/d\theta$	$d\Delta\delta_{35}/d\theta$	$d\Delta\delta_{34}/d\theta$	$d\Delta\delta_{54}/d\theta$
1–5	-0,11	-0,156	-0,046	-0,008	-0,038
5–4	-0,002	0,049	0,052	-0,111	-0,162

На основании этого в [10, 15] был сделан вывод о возможности в целях упрощения расчетов по определению  $\theta^{opt}$  и потерь активной мощности не принимать во внимание ветви, удаленные от рассматриваемого контура. Данное предположение было подтверждено в [15] на примере схемы реальной энергосистемы, включающей ОЭС Северо-Запада, Центра и Средней Волги, состоящей из 894 узла и 1383 ветви. Были выделены два фрагмента этой схемы, в которых загруженные ЛЭП 220 кВ работают в контуре с ЛЭП 500 кВ. Каждый из фрагментов, кроме самого контура, в который включается ФСТ, содержал смежные с ним контуры и отдельные ветви, непосредственно примыкающие к этому контуру. По алгоритму для каждого фрагмента схемы и с помощью программы RastrWin для всей схемы целиком были рассчитаны значения оптимального угла регулирования ФСТ по критерию минимальных потерь и потери активной мощности при установке ФСТ в различных ветвях этих фрагментов. Несмотря на то, что по алгоритму рассчитывались фрагменты схемы, а по программе – вся схема целиком, было совпадение по знаку угла и значения оптимальных углов получились близкими. Сделанный вывод в [10, 15] должен быть справедлив и при расчете угла регулирования ФСТ по предложенной методике, который нужно установить для обеспечения заданного значения потока активной мощности по ветви контура.

Покажем это на примере двухконтурной схемы, изображенной на рис. 4. Установленный в ветви 1–5 ФСТ, как видно из табл. 6, слабо влияет на изменение потока мощности в ветви 3–4, так как производная в этой ветви имеет наименьшее значение. Исключим данную ветвь из рассмотрения вместе с узлом 4. Оставим для рассмотрения узлы 3, 5 контура 1–3–5–1 и ветвь 5–4, потому что она непосредственно граничит с ветвью, в которой установлен ФСТ.

Составим систему уравнений (3, 4) для оставшихся узлов 3 и 5.

Для узла 3

$$-U_3 y_{13} \sin \alpha_{13} + U_1 y_{13} \sin(\delta_{13}^0 + \alpha_{13}) - \frac{P_{13}^{fix}}{U_3} - U_5 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 - \alpha_{35}) + U_5 y_{35} \sin(\delta_{13}^0 - \alpha_{35} + \Delta\delta_{35}) = 0.$$

Для узла 5

$$U_3 y_{15} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15}) - U_1 y_{15} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15} + \Delta\delta_{15} + \theta) + U_3 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 + \alpha_{35}) + U_3 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 + \alpha_{35} + \Delta\delta_{35}) - U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54}) +$$

$$+U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54} + \Delta\delta_{54}) = 0.$$

Уравнения контурного сдвига (6) записываются в виде

$$\Delta\delta_{15} - \Delta\delta_{35} - \Delta\delta_{13} = 0;$$

$$\Delta\delta_{54} + \Delta\delta_{35} = 0.$$

Дополнительное уравнение записывается в виде

$$P'_{13}{}^{fix} = -U_3^2 y_{13} \sin\alpha_{13} + U_1 U_3 y_{13} \sin(\delta_{13}^0 + \Delta\delta_{13} + \alpha_{13}).$$

В результате решения системы уравнений для упрощенной схемы сети получаем решения, представленные в табл. 7. Значение угла регулирования ФСТ получилось близким к значению, полученному по программе RastrWin для полной схемы. Погрешность составляет 7 %, что в абсолютных величинах составляет 1,5°. Приращения взаимных углов в контуре 1–3–5–1 получились практически совпадающими, исключение составляют приращения в ветви 3–5, связанной с отбрасываемой ветвью 3–4, и в ветви 5–4, связанной с исключенным из рассмотрения узлом 4. Надо заметить, что, исключив из двухконтурной схемы второй контур, мы пошли на очень грубые упрощения, по сути убрав половину схемы, однако несмотря на это знак угла регулирования совпал и его значение получилось близким к полученному по программе RastrWin. В более сложных многоконтурных схемах с большим количеством отборов мощностей погрешность расчета по упрощенной методике будет уменьшаться, так как влияние ФСТ на потоки мощностей в ветвях будет слабее.

Таблица 7

Расчет по упрощенным выражениям

ФСТ в ветви	Способ расчета	$\Delta\delta_{13}$ , град	$\Delta\delta_{15}$ , град	$\Delta\delta_{35}$ , град	$\Delta\delta_{34}$ , град	$\Delta\delta_{54}$ , град	$\theta^\circ$ , град
1–5	RastrWin	2,321	3,286	0,965	0,202	-0,764	-20
	Формула	2,328	3,376	1,0428	–	-1,0428	-18,5

Сформулируем алгоритм расчета угла регулирования ФСТ для обеспечения фиксированного значения потока активной мощности по ветви контура.

1. Определяются параметры  $y_{ij}$  и  $\alpha_{ij}$  ветвей исследуемой схемы и параметры рассчитанного исходного установившегося режима (модули напряжений в узлах  $U_i$ , углы между векторами напряжений по концам ветвей  $\delta_{ij}^0$ ). При этом для ветви с установленным в ней ФСТ проводимость ветви и ее угол записываются с учетом сопротивления ФСТ.

2. Для каждого узла схемы, кроме балансирующего, формируется уравнение (3) для определения приращений углов  $\Delta\delta_{ij}^0$  от угла регулирования ФСТ.

3. Кроме уравнения (3) для каждого независимого контура записываются уравнения суммы приращений углов  $\Delta\delta_{ij}^0$  в контуре с учетом направлений активной мощности в исходном режиме (7), а также уравнение мощности для ветви с заданным потоком мощности (6).

4. Решение системы уравнений дает значение угла регулирования ФСТ.

## Выводы

1. Предложенный алгоритм позволяет по параметрам электрической схемы сети и исходного установившегося режима в результате безытеративных расчетов определять знак угла регулирования ФСТ и его значение, которые необходимо установить для обеспечения интересующего значения потока активной мощности в одной из ветвей схемы сети.

2. Алгоритм позволяет анализировать схемы любой конфигурации и учитывает сопротивление ФСТ.

3. Алгоритм содержит однотипные уравнения, которые можно программировать.

4. Для расчета угла регулирования ФСТ достаточно рассмотреть фрагмент схемы сети, содержащий ветви контура, в который он установлен, и ветви контуров, примыкающих к контуру. Это значительно упрощает расчеты для больших сложнотоположностных электрических схем.

## Приложение 1

Для схемы, представленной на рис. 2, параметры верхней ветви с номинальным напряжением 500 кВ приведены к напряжению нижней ветви 220 кВ. Сопротивления ветвей и ФСТ:  $\underline{Z}_1 = 1,233 + j19,96$  Ом,  $\underline{Z}_2 = 19,6 + j84$  Ом,  $\underline{Z}_f = 3 + j30$  Ом. В узле 1 поддерживается напряжение  $U_1 = 220$  кВ, узел 2 – это шины с постоянным напряжением и постоянной активной нагрузкой. Параметры исходного режима при включенном ФСТ и при  $\theta = 0^\circ$  (без регулирования) имеют следующие значения:  $U_1 = 220$  кВ,  $U_2 = 219,997$  кВ,  $\delta^0 = 21,065^\circ$ ,  $P = 1000$  МВт.

## Приложение 2

Для схемы, представленной на рис. 3, параметры исходного режима с установленным ФСТ в ветви 1–5 и с углом регулирования, равным нулю, имеют следующие значения:  $U_1 = 220$  кВ,  $U_4 = 219,997$  кВ,  $U_5 = 207,81$  кВ,  $\delta_{14}^0 = 23,41^\circ$ ,  $\delta_{15}^0 = 19,47^\circ$ ,  $\delta_{54}^0 = 3,87^\circ$ ,  $P_4 = 1000$  МВт,  $\underline{S}_5 = 150 + j50$  МВ·А. Параметры схемы:  $\underline{Z}_{14} = 1,233 + j19,96$  Ом,  $\underline{Z}_{15} = 9,8 + j42$  Ом,  $\underline{Z}_{54} = 9,8 + j42$  Ом,  $\underline{Z}_f = 3 + j30$  Ом.

## Приложение 3

Для двухконтурной схемы, представленной на рис. 4, параметры исходного режима с включенным ФСТ без регулирования ( $\theta = 0^\circ$ ) имеют следующие значения:  $U_1 = 220$  кВ,  $U_4 = 219,997$  кВ,  $U_3 = 212,94$  кВ,  $U_5 = 212,24$  кВ,  $\delta_{13}^0 = 23,41^\circ$ ,  $\delta_{15}^0 = 19,47^\circ$ ,  $\delta_{54}^0 = 3,87^\circ$ . В узлах 1 и 4 напряжение поддерживается постоянным. Постоянная нагрузка  $P_4 = 1000$  МВт,  $\underline{S}_5 = 400 + j40$  МВ·А. Сопротивление ветвей и ФСТ:  $\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{34} = 0,62 + j9,99$  Ом,  $\underline{Z}_{54} = \underline{Z}_{15} = 9,8 + j42$  Ом,  $\underline{Z}_{35} = 0,09 + j4,62$  Ом,  $\underline{Z}_f = 3 + j30$  Ом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – М.: Торус Пресс, 2011. – 311 с.
2. Экспериментальное исследование параметров и режимов линии электропередачи с управляемой продольной компенсацией / В.А. Солдатов, Л.П. Калинин, М.В. Киорсак, С.В. Локтионов, Р.С. Бейм, С.Ю. Сыромятников // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 46–50.
3. Гибкие линии электропередачи с продольно-емкостной компенсацией и фазоповоротным

- трансформатором / М. Киорсак, В. Солдатов, Д. Зайцев, Л. Калинин. – Кишинев: АН Молдовы, 1997. – 213 с.
4. Han Z. Phase Shifter and Power Flow Control // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1982. – Vol. PAS-101, № 10. pp. 3790–3795.
  5. Xihg K., Kusic G. Application of Thyristor-controlled phase-shifters to minimize real power losses and augment stability of power systems // IEEE – Vol. 3, № 4, 1988, pp. 792–798.
  6. Baker R., Ciith G., Eglin P. Control algorithm for a static phase shifting transformer to enhance transient and dynamic stability of large power systems // IEEE Transactions on Power Apparatus and systems. – 1982. – Vol. PAS-101. № 9. pp. 3532–3542.
  7. Солдатов В.А., Дубков А.А. Применение фазового управления для снижения потерь мощности в энергосистемах // Изв. АН МССР. Сер. Физикотехнические и математические науки. – 1989. – № 2. – С. 48–51.
  8. Солдатов В.А., Дубков А.А. Применение продольных реакторов для снижения потерь мощности в электрических сетях // Изв. АН МССР. Сер. Физикотехнические и математические науки. – 1990. – С. 25–28.
  9. Verboomen J., Spaan F.J., Schavemaker P.H. Method for Calculating Total Transfer Capacity by Optimising Phase Shifting Transformer Settings // CIGRE 2008, С. 1–111.
  10. Локтионов С.В., Сыромятников С.Ю. Разработка алгоритма для выбора места установки фазорегулирующего трансформатора в энергосистеме // Вестник МЭИ. – 2003. – № 1. – С. 41–49.
  11. О применении фазосдвигающих трансформаторов в электрических сетях / П.П. Карымов, С.В. Локтионов, С.Ю. Сыромятников // Энергоаудит. – 2009. – № 3. – С. 27–31.
  12. Фазопоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане / Г.А. Евдокунин, Р.Н. Николаев, А.К. Исакаев, Б.К. Оспанов, Н.И. Утегулов // Новости электротехники. – 2007. – № 6 (48). – С. 38–41.
  13. Олыванг М.В., Остапенко Е.И., Кузнецова Г.А., Лоханин Е.К. Ступенчато регулируемые автотрансформаторы как средство оптимизации потокораспределения в электрических сетях // Симпозиум «Электротехника», 2010 г. Сборник докладов. Т. 1. В 2 ч. – Ч. 1. М.: ВЭИ, 1997. – С. 114–119.
  14. Khrennikov A.Yu., Gol'dshtein V.G., Skladchikov A.A. An analysis of the condition of the 6–500 kV overhead power lines of the Samara region // Power Technology and Engineering. – 2010. – № 44(4). – С. 322–326.
  15. Локтионов С.В. Разработка алгоритма для выбора мест установки фазорегулирующих трансформаторов в электрических сетях: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 2003. – 20 с.
  16. Технологии и технические средства управления режимами электроэнергетических систем / А.Ф. Бондаренко, А.А. Басов, В.Э. Воронницкий, С.В. Локтионов, Б.И. Макоклюев и др. Под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 358 с.

*Статья поступила в редакцию 20 апреля 2018 г.*

## **CALCULATION OF THE CONTROL ANGLE OF THE PHASE-SHIFTING TRANSFORMER (PST) AT A TASK OF THE FIXED POWER FLOW THROUGH A BRANCH**

**S. V. Loktionov**

National Research University (MPEI)  
14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation

**Abstract.** Phase-shifting transformers (PST) are used for forced redistribution of active power flows in the circuit in order to reduce its losses, as well as to change the power flow along the circuit branches for commercial or other purposes. Previously, an algorithm was proposed that allows to determine the best place of its installation in the circuit by the criterion of minimum active power losses and calculate the angle of PST control analytically, avoiding the search method. When deducing the formula for calculating the angle, the

---

S.V. Loktionov (Ph.D. (Techn.)), Senior Research.

*equations of power balance in the node were used. In this article the algorithm of calculation of regulation angle FST for providing the necessary flow of active power in one of branches of a circuit with application of this approach is considered. Examples of application of the algorithm for calculating the angle on different types of schemes are considered, the possibility of considering fragments of schemes for simplification of calculations, rather than the entire scheme consisting of a large number of nodes and branches is shown.*

**Keywords:** *electricity market, the operated systems of an electricity transmission, phase shifting transformer (PST), calculation of the control angle, power flow control.*

## REFERENCES

1. *Kochkin V.I., Shakaryan Y.G.* Primenenie gibkikh (upravlyaemykh) system elektroperedachi peremennogo toka v energosistemakh. – M.: Torus Press, 2011. – 311 c.
2. Eksperimentalnoe issledovanie parametrov i regimov linii elektroperedachi c uprvlyaemoi prodolnoi kompensatsii / *V.A. Soldatov, L.P. Kalinin, M.V. Kiorsak, C.V. Loktionov, R.S. Beim, S.Y. Syromyatnikov* // *Elektricheskie stantcii.* – 2001. – № 9. – С. 46–50.
3. Gibkie linii elektroperedachi c prodolno-emkostnoi kompensatsiei I fazopovorotnym transformatorom / *M. Kiorsak, V. Soldatov, D. Zaitcev, L. Kalinin.* – Kishinev: AN Moldovy, 1997. – 213 c.
4. *Han Z.* Phase Shifter and Power Flow Control // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.* – 1982. – Vol. PAS-101, № 10. pp. 3790–3795.
5. *Xihg K., Kusic G.* Application of Thyristor-controlled phase-shifters to minimize real power losses and augment stability of power systems // *IEEE.* – Vol. 3, № 4, 1988, pp. 792–798.
6. *Baker R., Ciith G., Eglin P.* Control algorithm for a static phase shifting transformer to enhance transient and dynamic stability of large power systems // *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems.* – 1982. – Vol. PAS-101. № 9. pp. 3532–3542.
7. *Soldatov V.A., Dubkov A.A.* Primenenie fazovogo upravleniya dlia snizheniya poter' mostchnosti v energosistemakh // *Izv. AN MSSR. Serya fizikotekhnicheskikh i matematicheskikh nauk.* – 1989. – № 2. – С. 48–51.
8. *Soldatov V.A., Dubkov A.A.* Primenenie prodolnykh reaktorov dlia snizheniya poter' moshchnosti v elektricheskikh setiakh // *Izv. AN MSSR. Serya fizikotekhnicheskikh i matematicheskikh nauk.* – 1990. – С. 25–28.
9. *Verboomen J., Spaan F.J., Schavemaker P.H.* Method for Calculating Total Transfer Capacity by Optimising Phase Shifting Transformer Settings // *CIGRE 2008, C. 1–111.*
10. *Loktionov S.V., Syromyatnikov S.Y.* Razrabotka algoritma dlia vybora mesta ustanovki fazoreguliruyushchego transformatora v energosisteme // *Vestnik MEI.* – 2003. – № 1. – С. 41–49.
11. O primenении fazosdvigayushchikh transformatorov v elektricheskikh setiakh / *R.R. Karymov, S.V. Loktionov, S.Y. Syromyatnikov* // *Energoaudit.* – 2009. – № 3. – С. 27–31.
12. Fazopovorotny transformator v pervyie v SNG primenen v Kazakhstane / *G.A. Evdokunin, R.N. Nikolaev, A.K. Iskakov, B.K. Ospanov, N.I. Utegulov* // *Novosti elektrotekhniki.* – 2007. – № 6 (48). – С. 38–41.
13. *Ol'shvang M.V., Ostapenko E.I., Kuznetsova G.A., Lokhanin E.K.* Stupenchato reguliruemye avto-transformatory kak sredstvo optimizatsii potokoraspredeleniya v elektricheskikh setiakh // *Simposium Elektrotekhnika 2010 god. Sbornik dokladov T.1 v 2-kh chastiakh.* – Ch. 1. Moskva: VEI. – 1997. – С. 114–119.
14. *Khrennikov A.Yu., Gol'dshtein V.G., Skladchikov A.A.* An analysis of the condition of the 6-500 kV overhead power lines of the Samara region // *Power Technology and Engineering.* – 2010. – № 44(4). – С. 322–326.
15. *Loktionov S.V.* Razrabotka algoritma dlia vybora mest ustanovki fazoreguliruyushchikh transformatorov v elektricheskikh setiakh: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk. – Moskva, MEI, 2003. – 20 c.
16. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva upravleniya rezhimami elektroenergeticheskikh system / A.F. Bondarenko, A.A. Basov, V.E. Vorotnitskii, S.V. Loktionov, B.I. Makoklyuev i dr.* Pod red. *Y.V. Sharova.* – M.: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017. – 358 c.

УДК 62–83(075.8)

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ\*

*Р.А. Уфа, В.А. Сулайманова, А.С. Гусев, С.А. Ставицкий*

Томский политехнический университет  
Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30

**Аннотация.** Гибридная модель вставки постоянного тока разработана на основе концепции гибридного моделирования и представляет собой синтез разработанных математических моделей трансформаторов связи, фильтров высших гармоник, фазных реакторов, цепи постоянного тока, физических моделей статического преобразователя напряжения, а также модели системы автоматического управления и защиты, алгоритмы функционирования которой реализованы на цифровом уровне. Представлен принцип построения математических моделей оборудования вставки постоянного тока на примере модели фильтра высших гармоник, а также физической модели статического преобразователя напряжения. Разработанная гибридная модель вставки постоянного тока интегрирована в моделирующий комплекс, реализованный на базе концепции гибридного моделирования, в котором подготовлена тестовая схема двухмашинной электроэнергетической системы. В данной схеме воспроизведены процессы при коротком замыкании и регулирование мощности через вставку постоянного тока. Полученные результаты моделирования совпадают с результатами, полученными в программном комплексе MatLAB Simulink, что говорит о соответствии разработанной модели цифровой. При этом свойства и возможности концепции гибридного моделирования и, как следствие, разработанной модели и моделирующего комплекса позволяют использовать их при моделировании функционирования больших электроэнергетических систем, в том числе в реальном времени и на неограниченном интервале времени, в отличие от многих цифровых программных и программно-аппаратных комплексов.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, вставки постоянного тока, концепция гибридного моделирования, гибридная модель, цифровое моделирование, анализ, сопоставление.

Растущая сложность электроэнергетических систем (ЭЭС) ставит новые задачи на пути обеспечения их надежности и устойчивости. В то же время достигнутый к настоящему моменту прогресс в области силовой полупроводниковой

---

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00862 «Совершенствование теории и практики демпфирования низкочастотных колебаний в электроэнергетической системе с помощью вставки постоянного тока».

*Руслан Александрович Уфа, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ), Инженерная школа энергетики (ИШЭ).*

*Венера Алмазовна Сулайманова, аспирант.*

*Александр Сергеевич Гусев (д.т.н., профессор), профессор ОЭЭ ИШЭ.*

*Сергей Александрович Ставицкий, аспирант.*

техники заставляет обращать все большее внимание на перспективность применения технологий передачи энергии постоянным током высокого напряжения, в частности вставки постоянного тока (ВПТ). Данное устройство доказало свою эффективность в решении задач несинхронного объединения ЭЭС, повышения пропускной способности элементов сети, интеграции распределенных возобновляемых источников энергии [1].

В то же время появление преобразователя напряжения (ПН) на базе более совершенных силовых полупроводниковых ключей (запираемые GTO тиристоры (Gate Turn-Off), биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) не только открыло новые возможности для повышения управляемости энергосистем, но и увеличило объем эксплуатационных и исследовательских задач на пути масштабного внедрения ВПН на базе ПН (ВПТН), обобщенная структура которой приведена на рис. 1 [1, 2].

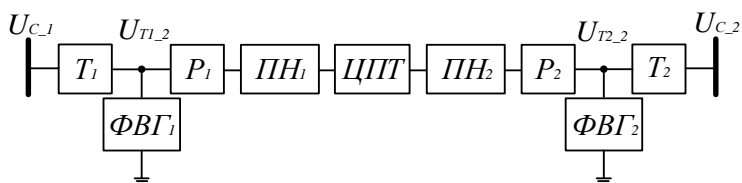


Рис. 1. Структурная схема ВПТН:

$T_1$  и  $T_2$  – трансформаторы связи; ФВГ1 и ФВГ2 – фильтры высших гармоник;  $P_1$  и  $P_2$  – фазные реакторы; ПН1 и ПН2 – статические преобразователи напряжения; ЦПТ – цепь постоянного тока

Свойства и возможности обозначенных устройств обеспечивают независимое регулирование активной и реактивной мощности, возможность работы в несимметричной сети (например, во время неисправности сети переменного тока или при наличии существенно несимметричных нагрузок с возможностью ее симметрирования), применимость в слабых сетях переменного тока и сетях с пассивными нагрузками [3, 4]. Кроме того, топология ПН позволяет реализовать многоуровневые схемы, что снижает требования к пассивным фильтрам, и возможность активной фильтрации высших гармоник [5, 6].

Однако внедрение ВПТН существенно изменяет динамические свойства ЭЭС и связанные с этим процессы и ставит новые задачи на пути обеспечения надежного функционирования создаваемых ЭЭС с ВПТН. В число наиболее сложных задач входят:

- исследование процессов во всех значимых элементах и ВПТН в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ВПТН и ЭЭС;
- разработка, тестирование и настройка систем управления ВПТН в ЭЭС;
- исследование функционирования ЭЭС, содержащих ВПТН, с целью обеспечения надежной и эффективной работы ЭЭС.

Решение указанных задач требует наличия полной и достоверной информации о процессах во всех значимых элементах ВПТН и ЭЭС в целом во всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы. При этом сложность поставленных задач, требующих комплексного исследования процессов в ЭЭС, а также характеристики самих ВПТН предъявляют достаточно высокие требования к системам моделирования [7, 8]:

- трехфазное моделирование;
- моделирование процессов в ЭЭС без декомпозиции и ограничений на их



длительность;

– отсутствие ограничений на размерность модели.

Данные свойства систем моделирования необходимы для всестороннего анализа взаимного влияния ВПТН и ЭЭС, а также их устройств управления и защиты в составе больших ЭЭС, и особенно при исследовании каскадных аварий [9, 10]. Немаловажным является воспроизведение процессов в масштабе реального времени для решения задач разработки, тестирования в замкнутом цикле и настройки систем управления и защиты ВПТН систем [11]. Кроме того, при моделировании больших ЭЭС реальное время моделирования позволяет значительно повысить продуктивность исследовательской работы [6, 10, 11].

На сегодняшний день в практике исследования ЭЭС преобладают цифровые системы моделирования, предельные возможности которых известны и в основном определяются применяемыми численными методами решения, поэтому при разработке моделей энергетического оборудования исходят из необходимого объема упрощений и допущений [7, 8, 11]. В настоящее время наблюдается тенденция к поиску новых технологий и инженерных решений, обеспечивающих такие ключевые характеристики систем моделирования, как реальное время, отсутствие декомпозиции процессов, неограниченная масштабируемость модели и др. Увеличивается количество работ в области создания гибридных моделирующих комплексов, основанных на использовании разных подходов моделирования [9, 11, 12]. Здесь можно выделить несколько направлений развития. Одним из них является применение различных численных методов – синтез нескольких цифровых комплексов, каждый из которых используется для решения определенного участка ЭЭС с соответствующим шагом расчета [9, 13]. В одной из подсистем моделируемой ЭЭС, где осуществляется воспроизведение электромагнитных процессов, шаг расчета обычно составляет 20 мкс, в то время как время переключения IGBT составляет 1–3 мкс. В другой подсистеме, где осуществляется воспроизведение электромеханических процессов, шаг расчета и соответственно обмен данными между подсистемами в процессе моделирования составляет 50 мкс. Таким образом, бездекомпозиционное моделирование, то есть предполагающее использование одного непрерывного метода решения математической модели ЭЭС и исключаящее разделение единого непрерывного спектра нормальных, аварийных и послеаварийных процессов на различные стадии, в полной мере не достигается.

Другим направлением является еще большая гибридизация моделирующих комплексов, которая заключается в использовании нескольких подходов моделирования – физического, аналогового и цифрового. Примером такого моделирующего комплекса является всережимный моделирующий комплекс реального времени (ВМК РВ) ЭЭС [14, 15].

### **1. Принципы построения гибридной модели ВПТН**

Анализ структуры, специфики функционирования оборудования и ВПТН в целом и указанный комплексный подход позволяют обоснованно сформулировать принципы построения гибридной модели ВПТН. Весь спектр значимых процессов в каждом оборудовании ЭЭС, не содержащем коммутационных элементов, полно и достоверно описывается теоретически строго обоснованными и надежно проверенными системами дифференциальных уравнений. Поэтому для трансформаторов связи, фильтров высших гармоник (ФВГ), фазных реакторов и цепи постоянного тока ВПТН обосновывается и синтезируется бездеком-

позиционная трехфазная математическая модель, достаточно полно и достоверно воспроизводящая единый непрерывный спектр квазиустановившихся и переходных процессов при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы (рис. 2). Решение данных уравнений осуществляется с помощью способа методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале системы дифференциальных уравнений синтезированной математической модели оборудования. Данный способ заключается в аналоговом решении систем дифференциальных уравнений с помощью интегрирующих звеньев на основании фундаментального закона, определяющего напряжение на конденсаторе  $U_c(t)$ , равное интегралу от протекающего через него тока  $\int i_c(t)$  [16]:

$$U_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t).$$

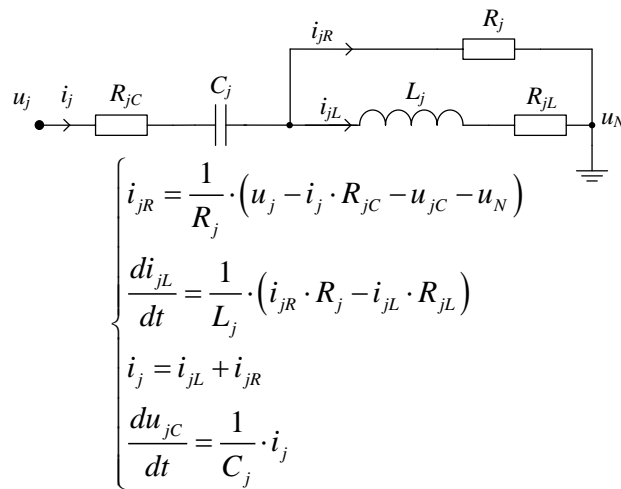


Рис. 2. Структурная схема и система дифференциальных уравнений ФВГ

Применение данного закона определяет отсутствие при таком подходе решения методической ошибки интегрирования в отличие от сугубо цифрового моделирования. Кроме этого, обеспечивается возможность параллельного решения, то есть одновременного (в одном масштабе времени) решения математических моделей оборудования, что снимает проблему последовательного вычисления и синхронизации обмена данными, характерную для цифровых моделирующих комплексов. Таким образом, для осуществления обозначенного способа разрабатывается и используется специализированная параллельная цифро-аналоговая структура решения математической модели оборудования, основу которой составляют решающие (или функциональные) элементы, выполняющие различные математические операции над подведенными к ним переменными. Решающие элементы строятся на основе усилителей постоянного тока, обладающих большими коэффициентами усиления и охваченных глубокой отрицательной обратной связью (рис. 3).

Далее разрабатывается функциональная схема специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры решения математической модели оборудования и проводятся предпроизводственные компьютерные исследования разработанной функциональной схемы. В частности, на рис. 4 представлено сопоставление частотных характеристик, полученных на основе математического описа-

ния и схемы замещения ФВГ, и разработанной модели ФВГ, что подтверждает ее адекватность.

Моделирование различных коммутаций силовых полупроводниковых ключей, а также линейных выключателей и разнообразных коротких замыканий осуществляется на физическом уровне с помощью цифруправляемых аналоговых ключей (ЦУАК). ЦУАК представляет собой комплементарную пару МОП-транзисторов («металл – оксид – полупроводник»), коммутационные характеристики которых (время коммутации составляет 300 нс [17]) позволяют считать их практически идеальными по сравнению с моделируемыми силовыми полупроводниковыми ключами, линейными высоковольтными выключателями и различными короткими замыканиями.

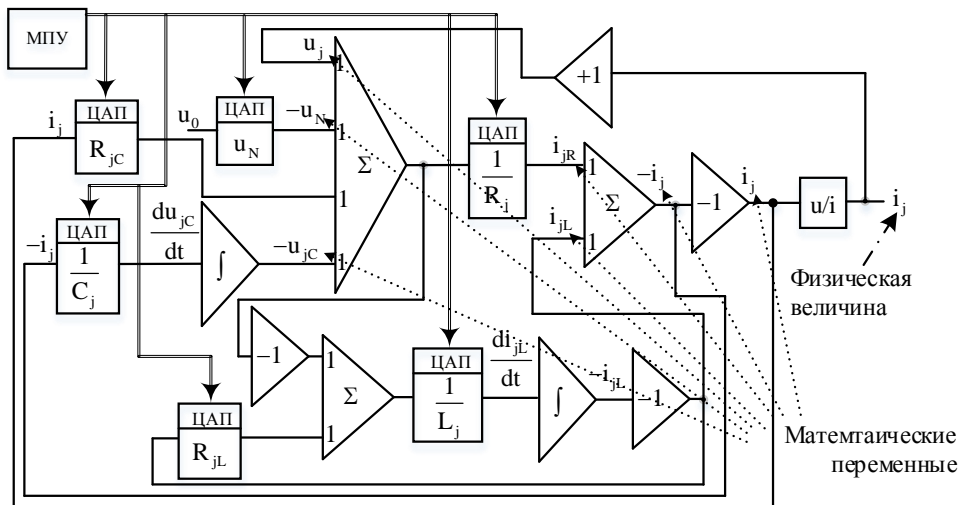


Рис. 3. Специализированная параллельная цифро-аналоговая структура решения математической модели ФВГ:

ЦАП – цифро-аналоговые преобразователи; МПУ – микропроцессорный узел

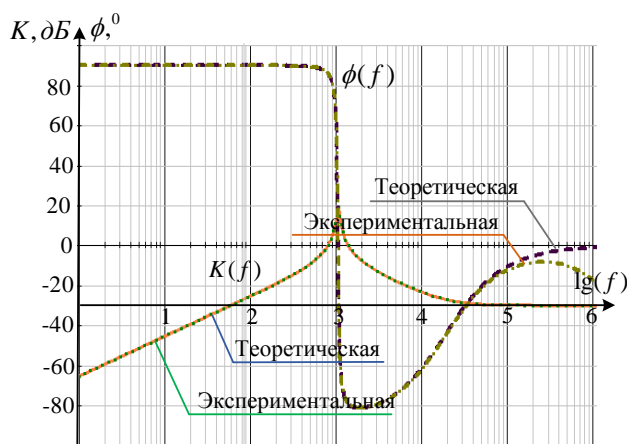


Рис. 4. Сравнение частотных характеристик разработанной модели ФВГ (экспериментальной) и характеристик, полученных на основе математического описания и схемы замещения (теоретических)

При этом ЦУАК – низковольтный аналог моделируемых полупроводниковых ключей, который может быть дополнен соответствующими RC-элементами для обеспечения более адекватного воспроизведения коммутационных процессов.

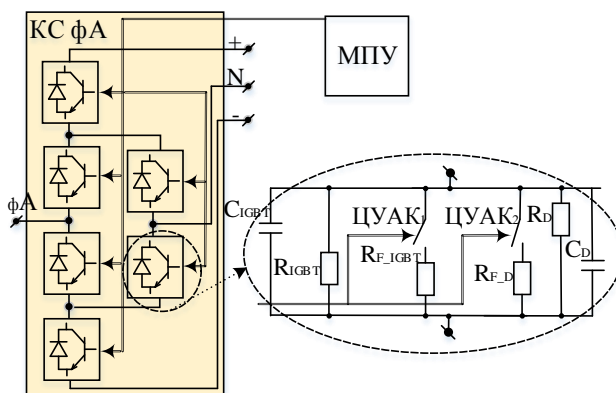


Рис. 5. Структурная схема физической модели одной фазы трехуровневого ПН и схема замещения воспроизводимых силовых ключей:  
 $C_{IGBT}$ ,  $R_{IGBT}$ ,  $R_{F,IGBT}$  – параметры схемы замещения IGBT;  
 $C_D$ ,  $R_D$ ,  $R_{F,D}$  – параметры схемы замещения D

Так, на рис. 5 представлена структурная схема физической модели одной фазы трехуровневого ПН, в которой каждый модуль коммутационной схемы соответствующей фазы (КС), образуемый встречно-параллельным включением IGBT транзистора и обратного диода (D), реализован посредством ЦУАК и схемой замещения воспроизводимых силовых полупроводниковых ключей. Связь математического и физического уровней осуществляется с помощью преобразования непрерывных математических переменных входных/выходных токов специализированных параллельных цифро-аналоговых структур в соответствующие им модельные физические токи посредством преобразователей напряжение/ток ( $u/i$ ) (рис. 3) [18]. Согласно реальной реализации современных систем автоматического управления и релейной защиты их моделирование целесообразно осуществлять посредством соответствующих алгоритмов, воспроизводимых на цифровом уровне.

Заключительным этапом разработки гибридной модели ВПТН является синтез разработанных математических и физических моделей, а также моделей систем автоматического управления и защиты [19]. В дальнейшем данная модель интегрируется в ВМК РВ ЭЭС для проведения необходимых экспериментальных исследований функционирования ВПТН в составе ЭЭС.

## 2. Результаты исследования функционирования ВПТН в составе двухмашинной ЭЭС

Согласно [20, 21], для оценки статических и динамических характеристик модели ВПТН достаточным является воспроизведение процессов регулирования, в том числе реверса мощности, а также процессов при коротком замыкании на стороне переменного тока ВПТН. Для проверки адекватности результатов моделирования проведено их сопоставление с данными, полученными в программном комплексе MatLAB Simulink [22].

В рамках данных исследований в ВМК РВ ЭЭС была подготовлена двухма-  
шинная ЭЭС с ВПТН (рис. 6).

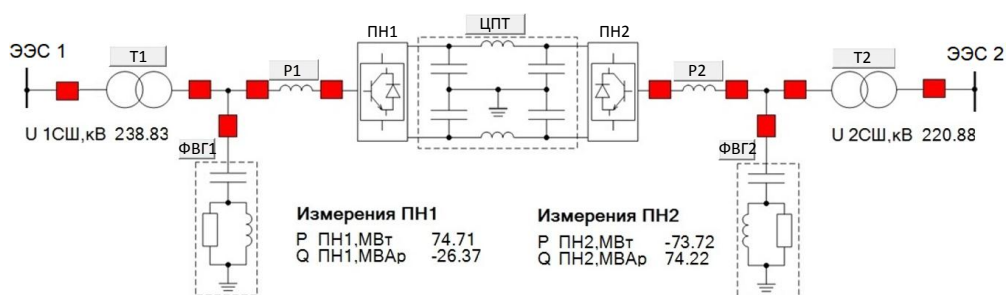


Рис. 6. Динамическая панель наблюдения и управления гибридной модели ВПТН

*Моделирование процессов регулирования и реверса мощности.* Согласно сценарию в момент времени  $t_1$  осуществляется ступенчатое (с интервалом  $\Delta t = 0.5$  сек) изменение уставки активной мощности (5 ступеней), затем в момент времени  $t_2$  направление мощности меняется. Изменение перетока мощности через ВПТН (рис. 7, а) осуществляется за время  $t \approx 0.5$  сек, что соответствует приводимому в литературе времени изменения перетока мощности через ВПТН [23, 24]. Процесс регулирования и реверса сопровождается колебаниями напряжения на конденсаторной батарее цепи постоянного тока (рис. 7, б), уровень которого контролируется системой автоматического управления ВПТН.

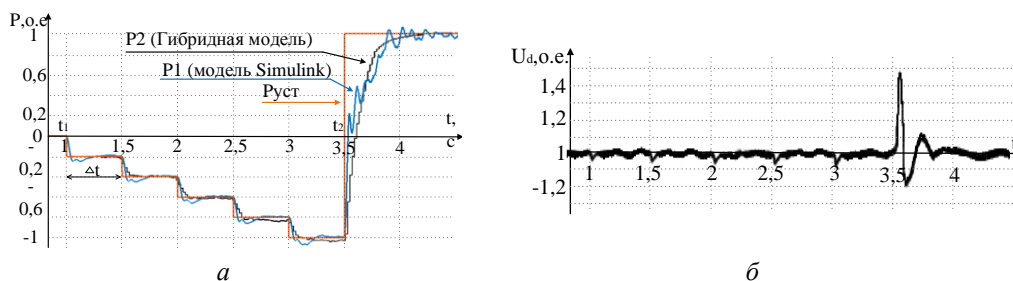


Рис. 7. Процессы регулирования перетока мощности (а)  
и напряжение на конденсаторной батарее цепи постоянного тока (б)

*Моделирование процессов при трехфазном коротком замыкании.* Согласно сценарию в момент времени  $t_1$  (рис. 8) происходит трехфазное короткое замыкание на стороне переменного тока со стороны ЭЭС2, которое снимается в момент времени  $t_2$ . Ток в месте повреждения возрастает до 2 о.е., напряжение со стороны ЭЭС2 снижается до нуля. При этом согласно алгоритму функционирования системы автоматического управления и релейной защиты при резком увеличении токов происходит «запирание» силовых ключей ПН, уменьшение величины передаваемой через ВПТН мощности практически до нуля, а на стороне ЭЭС1 осуществляется выдача реактивной мощности для поддержания уровня напряжения (рис. 9).

Полученные результаты моделирования демонстрируют возможности ВПТН для регулирования перетока мощности и уменьшения влияния короткого замыкания в объединяемых частях ЭЭС.

Кроме этого, результаты воспроизведения процессов с помощью гибридной модели ВПТН практически совпадают с данными программного комплекса MatLAB Simulink, что говорит о соответствии разработанной модели цифровой. При этом свойства и возможности концепции гибридного моделирования и, как следствие, моделирующего комплекса позволяют использовать разработанную модель в отличие от многих цифровых программных и программно-аппаратных комплексов при моделировании функционирования больших электроэнергетических систем, в том числе в реальном времени и на неограниченном интервале времени.

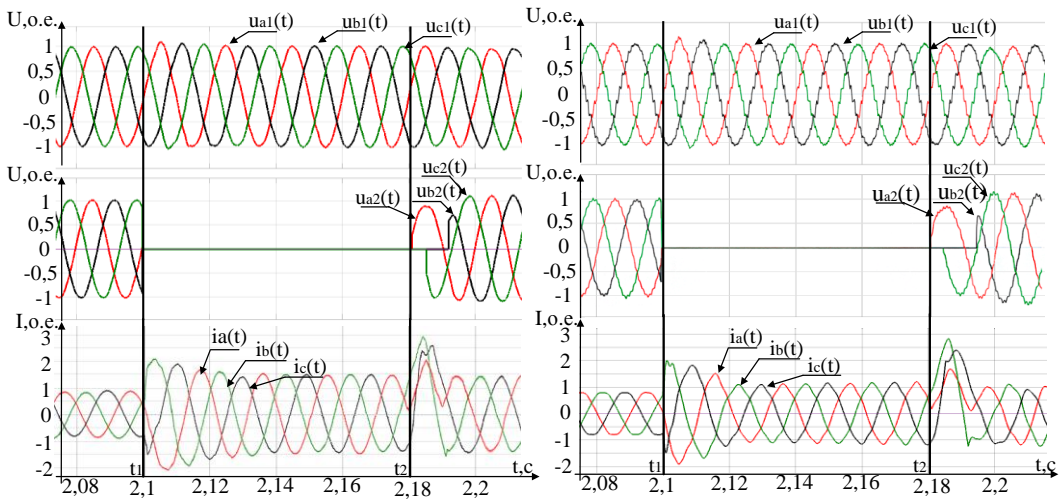


Рис. 8. Осциллограммы токов и напряжений при трехфазном коротком замыкании

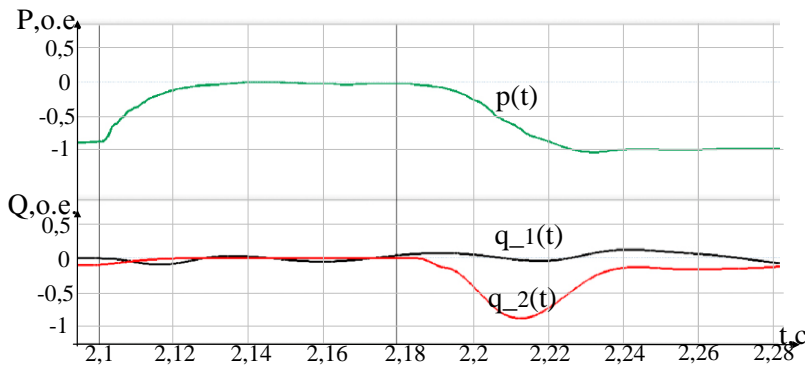


Рис. 9. Осциллограммы активной  $p(t)$  и реактивной  $q(t)$  мощностей при трехфазном коротком замыкании:  
 $q_1(t)$  и  $q_2(t)$  – реактивные мощности соответственно ПН1 и ПН2 ВПТН

## Выводы

1. Представлен краткий анализ существования проблемы получения полной и достоверной информации о процессах в ЭЭС, в том числе содержащих современные ВПТН, в рамках широко используемого цифрового моделирования.

2. Предложен способ решения данной проблемы на основе гибридного подхода моделирования.

3. Представлено описание принципов построения гибридной модели ВПТН.

4. Приведены результаты моделирования процессов регулирования мощности, процессов при коротком замыкании на стороне переменного тока ВПТН, которые демонстрируют ее возможности для регулирования перетока мощности и уменьшения влияния короткого замыкания в объединяемых частях ЭЭС.

5. Результаты воспроизведения процессов с помощью гибридной модели ВПТН практически совпадают с данными программного комплекса MatLAB Simulink, что говорит о соответствии разработанной модели цифровой.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alharbi M., Alfaris F.E., Bhattacharya S.* A novel current control strategy for a back-to-back HVDC applications under unbalanced operation conditions // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – Cincinnati, OH, USA: IEEE. – 2017. – С. 1263–1269.
2. *L'Abbate A., Fulli G.* Modeling and application of VSC-HVDC in the European transmission system // International Journal of Innovations in Energy Systems and Power. – 2010. – № 5(1). – С. 8–16.
3. *Setreus J., Bertling L.* Introduction to HVDC Technology for Reliable Electrical Power Systems // Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. – Rincon, USA: IEEE. – 2008. – С. 1–8.
4. *Sellick R.L., Akerberg M.* Comparison of HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme // 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. – Birmingham, United Kingdom: IET. – 2012. – С. 1–6.
5. *Xu L., Andersen B.R., Cartwright P.* VSC transmission operating under unbalanced AC conditions - analysis and control design // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – № 20(1). – С. 427–434.
6. *Guan M., Xu Z.* Modeling and Control of a Modular Multilevel Converter-Based HVDC System Under Unbalanced Grid Conditions // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – № 27(12). – С. 4858–4867.
7. *Zhang Y., Gole A.M., Wu W., Zhang B., Sun H.* Development and Analysis of Applicability of a Hybrid Transient Simulation Platform Combining TSA and EMT Elements // IEEE Transaction on power system. – 2013. – № 5(1). – С. 357–366.
8. *Nayak O., Santoso S., Buchanan P.* Power electronics spark new simulation challenges // IEEE Computer Applications in Power. – 2002. – № 15(4). – С. 37–44.
9. *Liu Z.H., Wang Y., Chen J.M., Guo Y.R., Wang X.G., Li Z.Q., D. Du X., Li X.* Modeling and simulation research of large-scale AC/DC hybrid power grid based on ADPSS // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – Kowloon, Hong Kong: IEEE. – 2014. – С. 1–6.
10. Impact of HVDC Stations on Protection of AC Systems / *Zhao X., Priebe T., Curis J-B.* – Research report. Joint Working Group JWG B5/B4.25, CIGRE, 2009. – 84 с.
11. *Zhang Y., Ding H., Kuffel R.* Key Techniques in Real Time Digital Simulation for Closed-loop Testing of HVDC Systems // CSEE journal of power and energy systems. – 2017. – № 3(2). – С. 125–130.
12. *Chen L., Zhang K.-J., Xia Y.-J., Hu G.* Hybrid Simulation of  $\pm 500$ kV HVDC Power Transmission Project Based on Advanced Digital Power System Simulator // Journal of electronic science and technology. – 2013. – № 11(1). – С. 66–71.
13. *Zhou X.X., Han Z.X., Tian F., Li F.L., Li F., Tian X S.* Concept and Mechanism on Full-Process Dynamic Real-Time Simulation of Power System with Parallel-in-Time-Space // International Conference on Power System Technology (POWERCON). – Hangzhou, China: IEEE. – 2010. – С. 1–7.
14. *Andreev M., Borovikov Y., Gusev A., Sulaymanov A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Bemš J., Králik T.* Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2018. – № 12(1). – С. 133–141.
15. *Уфа P.A., Гусев A.C., Васильев A.C., Сулайманов A.O., Суворов A.A.* Проблема адекватного моделирования функционирования вставок постоянного тока в электроэнергетических системах и средства ее решения (часть 1) // Известия РАН. Энергетика. – 2017. – № 5. – С. 32–46.
16. *Груздев И.А., Кадомская К.П., Кучумов Л.А.* Применение аналоговых вычислительных машин

- в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов / Под ред. Н.И. Соколова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1970. – 400 с.
17. Low-Voltage, Quad, SPST CMOS Analog Switches MAX4610/MAX4611/MAX4612 / Maxim Datasheet Doc. No. 19–4793. – pp. 1–11.
  18. Тимонтеев В.Н., Величко Л.М., Ткаченко В.А. Аналоговые перемножители сигналов в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Радио и связь, 2010. – 112 с.
  19. Пат. 2606308С 1 Российская Федерация, МПК G06G 7/62. Устройство для моделирования вставки постоянного тока в энергетических системах / Уфа Р.А., Гусев А.С., Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О., Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Суворов А.А., Сулайманова В.А. – № 2015151402; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет; заявл. 01.12.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.
  20. Petersson A., Edris A. Dynamic performance of the Eagle Pass back-to-back HVDC Light tie // 17 International Conference on AC-DC Power Transmission. – London, UK: IEEE. – 2001. – С. 220–225.
  21. Khatir M., Zidi S.-A., Hadjeri S., Fellah M.-K. Dynamic performance of a back-to-back HVDC station based on voltage source converters // Journal of Electrical Engineering. – 2010. – № 61(1). – С. 29–36.
  22. The MathWorks, Inc, "VSC-Based HVDC Link" [Online]. Available: <http://www.amdahl.com/doc/products/bsg/intra/infra/html>
  23. Волошин М.В., Демидов А.А., Никишин К.А., Тутаевская Н.А. Разработка алгоритмов управления ВПТ от централизованной системы автоматического регулирования частоты и перегоков активной мощности // Известия НТЦ ЕЭС. – 2015. – № 1(72). – С. 95–108.
  24. Drozdov A., Kiselev A., Suslova O. Current status and development VSC-based HVDC technologies in power system of Russian Federation // HVDC and Power Electronics International Colloquium. – Agra, India: Cigre. – 2015. – С. 1–9.

Статья поступила в редакцию 8 августа 2018 г.

## THE PRINCIPLES OF THE HYBRID BACK-TO-BACK HVDC MODEL

*R.A. Ufa, V.A. Sulaymanova, A.S. Gusev, S.A. Stavitskiy*

Tomsk Polytechnic University  
30, Lenina avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

**Abstract.** *The hybrid model of back-to-back HVDC is based on the concept of hybrid simulation and includes mathematical models of transformers, harmonic filters, phase reactors, direct current circuit and physical models of a static voltage converter, as well as model of an automatic control and protection system whose operation algorithms implemented at the digital level. The principle of realization of the mathematical models is presented, by example of the harmonic filter model, as well as the physical model of the static voltage converter. The developed hybrid model is integrated into the simulation complex, based on the concept of hybrid simulation, and in which a test scheme of a two-machine electric power system is prepared. In this scheme, the case of a short circuit and power control through the back-to-back HVDC are reproduced. The obtained simulation results coincide with the results obtained in the MatLAB Simulink, which indicates the compliance of the developed model to the digital model. In this case, the properties and capabilities of the concept of hybrid modeling, and as a result the developed model and simulation complex, allow using them in modeling the large scale electric power systems, including in real time and for an unlimited time interval, unlike many digital hard- and software complexes.*

---

*Ruslan A. Ufa, Senior lecturer.  
Venera A. Sulaymanova, Postgraduate Student.  
Alexander C. Gusev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Sergey A. Stavitskiy, Postgraduate Student.*



**Keywords:** electric power system, back-to-back HVDC, hybrid modeling technology, hybrid model, digital modeling, analysis, comparison.

## REFERENCES

1. *Alharbi M., Alfaris F.E., Bhattacharya S.* A novel current control strategy for a back-to-back HVDC applications under unbalanced operation conditions // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – Cincinnati, OH, USA: IEEE. – 2017. – P. 1263–1269.
2. *L'Abbate A., Fulli G.* Modeling and application of VSC-HVDC in the European transmission system // International Journal of Innovations in Energy Systems and Power. – 2010. – № 5(1). – P. 8–16.
3. *Setreus J., Bertling L.* Introduction to HVDC Technology for Reliable Electrical Power Systems // Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. – Rincon, USA: IEEE. – 2008. – P. 1–8.
4. *Sellick R.L., Åkerberg M.* Comparison of HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme // 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. – Birmingham, United Kingdom: IET. – 2012. – P. 1–6.
5. *Xu L., Andersen B.R., Cartwright P.* VSC transmission operating under unbalanced AC conditions – analysis and control design // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – № 20(1). – P. 427–434.
6. *Guan M., Xu Z.* Modeling and Control of a Modular Multilevel Converter-Based HVDC System Under Unbalanced Grid Conditions // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – № 27(12). – P. 4858–4867.
7. *Zhang Y., Gole A.M., Wu W., Zhang B., Sun H.* Development and Analysis of Applicability of a Hybrid Transient Simulation Platform Combining TSA and EMT Elements // IEEE Transaction on power system. – 2013. – № 5(1). – P. 357–366.
8. *Nayak O., Santoso S., Buchanan P.* Power electronics spark new simulation challenges // IEEE Computer Applications in Power. – 2002. – № 15(4). – P. 37–44.
9. *Liu Z.H., Wang Y., Chen J.M., Guo Y.R., Wang X.G., Li Z.Q., D. Du X., Li X.* Modeling and simulation research of large-scale AC/DC hybrid power grid based on ADPSS // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – Kowloon, Hong Kong: IEEE. – 2014. – P.1–6.
10. Impact of HVDC Stations on Protection of AC Systems / *Zhao X., Priebe T., Curis J-B.* – Research report. Joint Working Group JWG B5/B4.25, CIGRE, 2009. – 84 p.
11. *Zhang Y., Ding H., Kuffel R.* Key Techniques in Real Time Digital Simulation for Closed-loop Testing of HVDC Systems // CSEE journal of power and energy systems. – 2017. – № 3(2). – P. 125–130.
12. *Chen L., Zhang K.-J., Xia Y.-J., Hu G.* Hybrid Simulation of  $\pm 500$ kV HVDC Power Transmission Project Based on Advanced Digital Power System Simulator // Journal of electronic science and technology. – 2013. – № 11(1). – P. 66–71.
13. *Zhou X.X., Han Z.X., Tian F., Li F.L., Li F., Tian X S.* Concept and Mechanism on Full-Process Dynamic Real-Time Simulation of Power System with Parallel-in-Time-Space // International Conference on Power System Technology (POWERCON). – Hangzhou, China: IEEE. – 2010. – P. 1–7.
14. *Andreev M., Borovikov Y., Gusev A., Sulaymanov A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Bemš J., Králik T.* Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2018. – № 12(1). – P. 133–141.
15. *Ufa R.A., Gusev A.S., Vasilev A.S., Sulaymanov A.O., Suvorov A.A.* Challenges for adequate simulation of Back-To-Back High Voltage Direct Current link in electric power system (Part 1) // «Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering» Journal. – 2017. – № 5. – P. 32–46.
16. *Gruzdev I.A., Kadomskaya K.P., Kuchumov L.A.* Primenenie analogovykh vychislitel'nykh mashin v ehnergeticheskikh sistemakh. Metody issledovaniya perekhodnykh protsessov / pod red. N.I. Sokolova. – Izd. 2-e, pererab. i dop. – M.: Energiya, 1970. – 400 p.
17. Low-Voltage, Quad, SPST CMOS Analog Switches MAX4610/MAX4611/MAX4612 / Maxim Datasheet Doc. No. 19–4793. – pp. 1–11.
18. *Timonteev V.N., Velichko L.M., Tkachenko V.A.* Analogovye peremnozhiteli signalov v radioelektronnoy apparature. – M.: Radio i svyaz', 1982. – 112 p.
19. Pat. 2606308S 1 Rossijskaya Federatsiya, MPK G06G 7/62. Ustrojstvo dlya modelirovaniya

- vstavki postoyannogo toka v ehnergeticheskikh sistemakh / Ufa R.A., Gusev A.S., Borovikov YU.S., Sulajmanov A.O., Andreev M.V., Ruban N.YU., Suvorov A.A., Sulajmanova V.A. – № 2015151402; zayavitel' i patentoobladatel' Tomskij politekhnicheskij universitet; zayavl. 01.12.2015; opubl. 10.01.2017, Byul. № 1.
20. *Petersson A., Edris A.* Dynamic performance of the Eagle Pass back-to-back HVDC Light tie // 17 International Conference on AC-DC Power Transmission. – London, UK: IEEE. – 2001. – P. 220–225.
  21. *Khatir M., Zidi S.-A., Hadjeri S., Fellah M.-K.* Dynamic performance of a back-to-back HVDC station based on voltage source converters // Journal of Electrical Engineering. – 2010. – № 61(1). – P. 29–36.
  22. The MathWorks, Inc, "VSC-Based HVDC Link" [Online]. Available: <http://www.amdahl.com/doc/products/bsg/intra/infra/html>
  23. *Voloshin M.V., Demidov A.A., Nikishin K.A., Titaevskaya N.A.* Algorithms development for HVDC back-to-back link control from centralized load frequency control system // Proceedings of the STC UPS. – 2015. – № 1 (72). – P. 95–108.
  24. *Drozдов A., Kiselev A., Suslova O.* Current status and development VSC-based HVDC technologies in power system of Russian Federation // HVDC and Power Electronics International Colloquium. – Agra, India: Cigre. – 2015. – P. 1–9.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В журнале предполагается публикация статей объемом до 10 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 3-4 стр. вместе с рисунками и таблицами).

В приоритетном порядке рассматриваются материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуется представлять в форме кратких сообщений.

**Требования к оформлению статей находятся на сайте университета**

**<http://vestnik-teh.samgtu.ru>**

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

***Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.***

Статьи и краткие сообщения передаются ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: [vest\\_teh@samgtu.ru](mailto:vest_teh@samgtu.ru)

Редколлегия журнала