

## СОДЕРЖАНИЕ

## ЭНЕРГЕТИКА

|  |    |
|--|----|
| ВАРЫГИНА А.О., САВИНА Н.В. Расчет длительно допустимого тока проводов нового поколения воздушных линий. ....     | 3  |
| МУБАРАКОВ И.И., ШИГАПОВ А.Б. Влияние отборов охлаждающего воздуха на эффективность газотурбинной установки. .... | 16 |
| ЗЛОБИН В.Г., ЗВЕРЕВ Л.О. Повышение эффективности котельных установок на жидком топливе. ....                     | 24 |
| КИСЕЛЁВ В.Г. О неоднозначности понятия энтропия идеального газа. ....  | 32 |

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

|  |    |
|--|----|
| МАСАЕВ С.Х., МАКАЕВ У.Х., ДЕБИЕВ М.В. Основные этапы повышения функционирования электросетевого комплекса Чеченской Республики. .... | 43 |
| ГАЛЕЕВ Л.М. Исследование напряжения в линейно нагруженной электрической сети, образованного плоской электромагнитной волной. ....    | 54 |
| ГОРОДНОВ А.Г. Построение энергоэффективных электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения. ....                | 64 |

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

|  |     |
|--|-----|
| НАСЫРОВ И.К., АНДРЕЕВ В.В. Моделирование информационного канала с использованием хаотических сигналов нелинейных динамических систем. ....                         | 79  |
| ЦВЕТКОВ А.Н., КОРНИЛОВ В.Ю., САФИН А.Р., ЛОГАЧЕВА А.Г., ПЕТРОВ Т.И., КУВШИНОВ Н.Е. Управляющая измерительно-информационная система экспериментального стенда. .... | 88  |
| ТАНЕЕВА А.В., ИЛЬИН В.К. Разработка метода контроля органических объектов с использованием арсенированных сорбентов. ....  | 99  |
| ГАРНЫШОВА Е.В., ИЗМАЙЛОВА Е.В., ВАНЬКОВ Ю.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний. ....               | 106 |
| СВИНИН А.Ю., КАШАЕВ Р.С., КОЗЕЛКОВ О.В. Разработка магнитной системы датчика для ПМР-анализатора. ....   | 115 |

## C O N T E N T S

## POWER ENGINEERING

|   |    |
|---|----|
| VARYGINA AO, SAVINA NV. Calculation the current carrying capacity of the new generation overhead lines conductors. .... | 3  |
| MUBARAKOV II, SHIGAPOV AB. Influence of cooling air selections on the efficiency of a gas turbine installation. ....    | 16 |
| ZLOBIN VG, ZVEREV LO. Improving the efficiency of liquid fuel boiler plants. ....                                       | 24 |
| KISELEV VG. On the ambiguity of an ideal gas entropy concept. ....  | 32 |

## ELECTRICAL ENGINEERING

|   |    |
|---|----|
| MASAEV SKH, MACAEV UKH, DEBIEV MV. The basic stages of improving the power grid complex functioning of the Chechen Republic. .... | 43 |
| GALEEV LM. Investigation of the plane wave coupling to a linearly loaded transmission line network. ....                          | 54 |
| GORODNOV AG. Design of energy efficient electrotechnical complexes with an autonomous electric supply system. ....                | 64 |

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING  
DEVICES AND SYSTEMS

|  |     |
|--|-----|
| NASYROV IK, ANDREEV VV. Modeling of information channel by using of pseudorandom signals of nonlinear dynamical systems. ....                        | 79  |
| TSVETKOV AN, KORNILOV VYU, SAFIN AR, LOGACHEVA AG, PETROV TI, KUVSHINOV NE. Control measuring and information system of the experimental stand. .... | 88  |
| TANEEVA AV, ILYIN VK. Development of methods for monitoring organic objects using arsenic sorbents. ....   | 99  |
| GARNYSHOVA EV, IZMAYLOVA EV, VANKOV YUV. Deposit thickness control of the heat exchange equipment by hardware and software complex. ....             | 106 |
| SVININ AY, KASHAEV RS, KOZELKOV OV. The development of the magnetic system of sensor for PMR-analyser. ....  | 115 |



## РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО ТОКА ПРОВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

А.О. Варыгина, Н.В. Савина

Амурский государственный университет,  
г. Благовещенск, Россия  
alleks\_13@mail.ru, nataly-savina@mail.ru

**Резюме:** Величины токов, при которых температура достигает максимального допустимого значения, являются длительно допустимыми токовыми нагрузками проводов, которые определяют пропускную способность воздушных линий электропередачи. Корректная оценка допустимых нагрузок линий электропередачи имеет важное практическое значение, так как связана с механической прочностью провода, стрелами провеса и величиной передаваемой мощности. Методические подходы к определению длительно допустимых токовых нагрузок традиционных сталеалюминевых проводов разработаны, хотя и уточняются до сих пор. В то же время для проводов нового поколения, ставшими отличным техническим решением для развития электросетевого комплекса, такие подходы не выработаны. Целью статьи является оценка возможности адаптации методики расчета длительно допустимого тока проводов традиционной конструкции к расчёту проводов нового поколения. В статье показана математическая модель расчета длительно допустимого тока провода, которая применена для ряда сопоставимых по сечению проводников. Приводится классификация входящих в модель параметров и коэффициентов от влияющих факторов. Результаты анализа и расчета показали, что представленная в статье математическая модель может быть адаптирована для расчета значений длительно допустимого тока для проводов нового поколения при условии уточнения ряда параметров и коэффициентов, входящих в её состав.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, провода нового поколения, длительно допустимый ток, тепловой расчет провода, электросетевой комплекс.

**Для цитирования:** Варыгина А.О., Савина Н.В. Расчет длительно допустимого тока проводов нового поколения воздушных линий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-3-15.

## CALCULATION THE CURRENT CARRYING CAPACITY OF THE NEW GENERATION OVERHEAD LINES CONDUCTORS

AO. Varygina, NV. Savina

Amur State University, Blagoveshchensk, Russia  
alleks\_13@mail.ru, nataly-savina@mail.ru

**Abstract:** Currently, there is an increase in power flows along power lines. An important task for the development of the power grid complex is to increase the current-carrying capacity of existing power lines. The use of advanced conductors has become a successful technical solution for this purpose. "New generation conductors" are modern conductors that have advanced mechanical and electrical properties and characteristics. Thus, it has become important to have information about the maximum operation temperature and current limits of the overhead line with new conductors. The approximate current-carrying capacity in Amperes is the value of current at which the conductor temperature reaches its maximum permissible value. It determines the maximum current load of overhead power lines. For traditional steel-

*aluminum conductors, there are several methodological approaches to determining the maximum current load. This fact complicates the definition of an approach to calculating the current carrying capacity for advanced conductors. Nevertheless, the general basis of all methodological approaches is the thermal balance of the conductor. The purpose of this article is to assess the possibility of adapting the method of calculating the approximate current-carrying capacity of traditional conductors to the calculation of advanced conductors. The article deals with advanced conductors of various brands of comparable cross-section with the classic ACSR 240/39. This work provides information about the selected conductors, their characteristics and design features. The paper shows a mathematical model for calculating the approximate current-carrying capacity of a conductor and shows calculating results for selected conductors. According to the results of analysis and calculations, the adaptation of the presented mathematical model is possible if we refine its parameters and coefficients.*

**Keywords:** *overhead power line, new generation conductors, current carrying capacity, thermal calculation of the conductor, power grid complex.*

**For citation:** Varygina AO, Savina NV. Calculation the current carrying capacity of the new generation overhead lines conductors. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(4):3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-3-15.

### **Введение**

Фактические данные потребления электроэнергии прошлых лет, энергетические прогнозы и современный уровень развития техники и технологий говорят о том, что потребление электрической энергии в мире в долгосрочной перспективе будет расти. Так, несмотря на имеющиеся колебания потребления электроэнергии в различных странах при использовании мер энергосбережения и повышения энергетической эффективности, глобальное потребление электрической энергии в 2018 году увеличилось на 3,5 %. В соответствии с экспертно-аналитическим докладом Центра стратегических разработок (ЦСР) мировое потребление электроэнергии к 2035 году может вырасти на 40-50 %.

Постоянный рост нагрузок и необходимость увеличения пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП) заставляют искать альтернативные решения традиционным подходам модернизации ЛЭП (увеличение сечения провода, строительство дополнительных линий классического исполнения). Активные обсуждения строительства воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) с использованием проводов нового поколения, которые делятся уже достаточно долго, подтвердили значительные положительные эффекты, которые удаётся достигнуть новыми техническими решениями. О нескольких проектах успешного опыта и достигнутых эффектах применения проводов нового поколения в России можно узнать из [1], а за рубежом – из [2-4]. Мировой и российский рынки предлагают провода для линий электропередачи новых конструкций, способные решать современные задачи эффективного функционирования ВЛЭП.

«Провода нового поколения» (ПНП) – широкое понятие, которое объединяет в себе целые группы современных проводников, имеющие повышенные механические и электрические свойства и характеристики.

Величины токов, при которых температура достигает максимального допустимого значения, являются длительно допустимыми токовыми нагрузками проводов. Они определяют пропускную способность ВЛЭП. Корректная оценка допустимых нагрузок ЛЭП имеет важное практическое значение, так как связана с механической прочностью провода, стрелами провеса и величиной передаваемой мощности. При больших нагрузках провода ЛЭП могут перегреться, растянуться и провиснуть ниже допустимых величин, что может привести к отключению линии, аварийной ситуации и недоотпуску электроэнергии.

Для сталеалюминевых проводов АС существует несколько методических подходов определения предельной токовой нагрузки, например, приведенных в [5-6]. Общей основой всех методических подходов является тепловой баланс провода, к тому же общей чертой является использование эмпирических формул расчёта составляющих теплового баланса, но реализация расчетов – отличается. Каждый из подходов имеет как свои сильные, так и слабые стороны. В силу актуальности и большой практической значимости обсуждения как по сравнению существующих методических подходов [7-8], так и по их улучшению не утихают [9].

Необходимость инновационного развития электросетевого комплекса вынуждает

пересматривать существующие методические подходы к проектированию ВЛЭП. Более того, в некоторых случаях методическая база решения задачи отсутствует. Примером этому может служить отсутствие методики расчета предельных токовых нагрузок для проводов нового поколения.

Целью статьи является оценка возможности адаптации методики расчета длительно допустимого тока проводов традиционной конструкции к расчёту проводов нового поколения.

Для этого должны быть решены следующие задачи:

- анализ ключевых параметров, обуславливающих отличие проводов нового поколения от традиционных;
- определение математической модели расчета длительно допустимого тока;
- применение выбранной математической модели расчета длительно допустимого тока традиционных проводов к проводам нового поколения;
- оценка допустимости полученных результатов расчета.

#### **Материалы и методы**

Неизолированные провода нового поколения классифицируются по признакам компактности и допустимой температуре нагрева провода при эксплуатации на два основных класса: компактированные и высокотемпературные.

Улучшенные характеристики ПНП определяются следующими особенностями или их комбинацией:

- геометрия поперечного сечения проволок токопроводящих повивов, которая может отличаться по отдельным повивам или быть одинаковой;
- форма сечения проволок, которая кроме круглой, может быть Z-образной, трапецидальной, стреловидной,  $\Omega$  – образной или иной;
- материал сердечника, который может совпадать с материалом токопроводящей части провода, а может быть абсолютно отличен (на основе стали, композитные материалы);
- материал проволок токопроводящих повивов (современные алюминиевые сплавы).

Приведём несколько конкретных примеров ПНП и их характеристики.

1. AACSR – представляют собой компактированные провода типа Z провода из алюминиевого сплава, по крайней мере, с одним слоем Z-образных проволок (для получения практически идеально гладкого наружного слоя), с сердечником из стальной оцинкованной проволоки, при этом межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной жаростойкости.

2. ACk2y – провод компактированный с усиленным стальным сердечником и несколькими концентрическими повивами профилированных алюминиевых проволок трапециевидной формы. Такая конструкция провода позволяет получить внешнюю поверхность провода практически гладкой, за счет чего ещё и уменьшается диаметр провода. Сравнивая диаметры проводов марки AC с диаметрами проводов марки ACk2y с такой же площадью поперечного сечения видно, что диаметры вторых меньше в среднем на 10%. Этот факт способствует уменьшению аэродинамической и гололедной нагрузки.

3. ACCC – представляет собой провод с композитным сердечником из углеродного волокна (карбоновые нити). К основным преимуществам этого провода относят его высокую прочность и небольшую массу, кроме этого он обладает низким коэффициентом линейного расширения и высокой рабочей температурой. Он более устойчив к коррозии, обладает повышенным сопротивлением усталости и безвреден для окружающей среды (отсутствие экологической деградации). В коммерческую эксплуатацию провод марки ACCC введён с 2005 года.

Важно отметить, что научно-исследовательские работы в направлении улучшения характеристик проводов с композитным сердечником ведутся и в настоящее время как отечественными, так и зарубежными компаниями. Провод марки ACCC является лишь одним из представителей целой группы проводов с композитным сердечником.

4. АСТ – термостойкий провод, опыт использования в России составляет не более 10 лет, поскольку его разработка была завершена в 2010 году. Провод АСТ прошел успешную аттестацию комиссиями энергетических компаний. Визуально конструктивно не отличается от провода AC. Главная особенность провода АСТ заключается в использовании алюминий-циркониевого сплава в качестве токопроводящего материала.

Как правило, инновационные провода используют для повышения пропускной способности ВЛЭП, однако, в каждом конкретном случае эффекты от применения той или

иной марки провода будут варьироваться. Стоимость инновационных решений зачастую достаточно высока, поэтому к обоснованию применения того или иного провода необходимо подходить очень тщательно и внимательно.

В рамках статьи будут рассмотрены провода различных марок сопоставимого сечения с классическим проводом АС 240/39, количественные характеристики которых представлены в табл. 1, а конструктивное исполнение показано на рис. 1-4.

Таблица 1

Количественные характеристики проводов

| Провод  | АС<br>240/39 | AACSR<br>251 | АСк2у<br>240/39 | АССС<br><i>Copenhagen</i> 230 | АСТ<br>240/39 |
|---|--------------|--------------|-----------------|-------------------------------|---------------|
| Диаметр, мм   | 21,6         | 19,1         | 19,6            | 18,29                         | 22,4          |
| Сечение провода, мм <sup>2</sup>  | 274,6        | 251,0        | 279             | 251,0                         | 274,6         |
| Удельная масса, кг/км   | 952          | 875          | 954             | 669,7                         | 921           |
| Электрическое сопротивление 1 км провода постоянному току при 20 °С, Ом | 0,1222       | 0,1538       | 0,1210          | 0,1254                        | 0,1217        |
| Температурный коэффициент сопротивления, 1/°С                           | 0,00403      | 0,0036       | 0,00403         | 0,00403                       | 0,00403       |
| Длительно допустимая температура, °С                                    | 70           | 90           | 90              | 180                           | 210           |
| Коэффициент теплоотдачи,  | 20,66        | 23,53        | 18              | 25,59                         | 18,4          |
| Длительно допустимый ток, А   | 610          | 651          | 826             | 1024                          | 1375          |

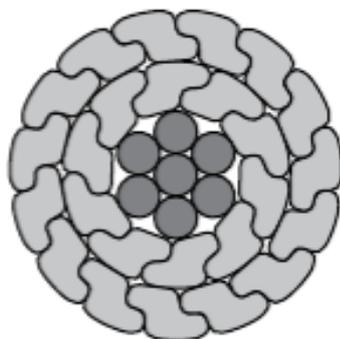


Рис. 1. Конструктивное исполнение AACSR 251:  
алюминий 25 шт. (10+15) x 3,33 и 3,32 мм; сталь 7 шт. (1+6) x 2,50 мм

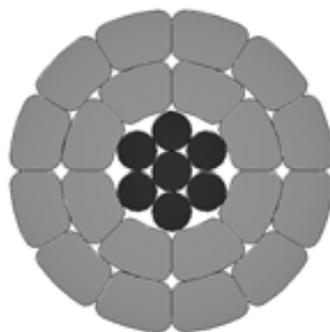


Рис. 2. Конструктивное исполнение АСк2у 240/39:  
алюминий 20 шт. (8+12) x 3,87 и 3,91 мм; сталь 7 шт. (1+6) x Ø2,65 мм

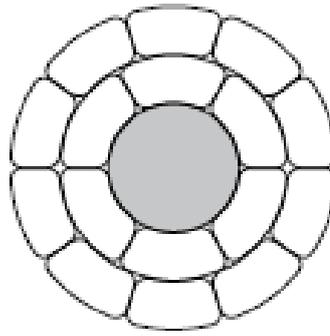


Рис. 3. Конструктивное исполнение ACCS Copenhagen 230: алюминий 16 шт. (6+10) x Ø4,21 мм; композит 1 шт. x Ø5,97 мм

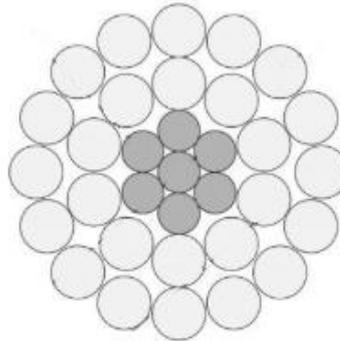


Рис. 4. Конструктивное исполнение АСТ 240/39: сплав 26 шт. (10+16) x Ø3,40 мм; сталь 7 шт. (1+6) x Ø2,65 мм

Таким образом, конструктивное исполнение ВЛЭП в части применяемых проводов на сегодняшний день претерпело существенные изменения. Наряду с традиционными марками проводов появились термостойкие провода, провода со сниженными ветрогололедными нагрузками, провода с уменьшенной стрелой провеса, провода с композитным сердечником и ряд других проводов, которые выигрывают по сравнению характеристик с традиционными проводами [10-11]. Эти изменения являются частью перехода электросетевого комплекса на инновационную платформу и наделяют сеть новыми системными свойствами [12]. Анализ поведения проводов нового поколения в различных условиях эксплуатации становится первоочередной задачей. Анализ теплового поведения неизолированных электрических проводников даёт важную информацию о максимальных температурных и токовых пределах работы ВЛ.

Существует два случая теплового расчета. Первый случай – расчёт температуры проводника при известном токе. Второй случай – расчёт тока при максимальной допустимой величине температуры провода. В статье рассматривается случай теплового расчета провода, который заключается в расчете тока при максимальной допустимой величине температуры провода, т.е. определяется его предельная токовая нагрузка.

Уравнение теплового баланса провода при стационарном (установившемся) режиме в общем виде имеет вид:

$$P_J + P_M + P_S + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (1)$$

где  $P_J$  – нагрузочные (активные) потери в проводе, Вт;  $P_M$  – магнитные потери, Вт;  $P_S$  – мощность солнечного излучения, поглощаемая проводом, Вт;  $P_i$  – потери мощности на корону, Вт;  $P_c$  – мощность, отдаваемая проводом в воздух за счет конвективного теплообмена, Вт;  $P_r$  – мощность, отдаваемая проводом в воздух за счет излучения, Вт;  $P_w$  – мощность, отдаваемая проводом в воздух за счет испарения, Вт.

Математическая модель допустимого тока в [6] в общем виде представлена следующим образом:

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s - P_i}{P_J + P_M}} \quad (2)$$

При использовании формул, характеризующих каждую составляющую мощности

из уравнения теплового баланса провода с пренебрежением в силу малости значений  $P_w$ , в [13] получена математическая модель длительно допустимого тока в виде:

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{(\alpha_k + \alpha_{\text{л}}) \cdot F \cdot (T_{\text{ав}} - T_a) - \varepsilon_n \cdot k_H \cdot D \cdot W_p \cdot \sin \psi_c - P_i}{k_M \cdot k_j \cdot R_{20} \cdot (1 + \beta_r (T_{\text{ав}} - 20))}}$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент, учитывающий теплоотдачу при теплообмене конвекцией, Вт / м<sup>2</sup>·°С;  $\alpha_{\text{л}}$  – коэффициент, учитывающий теплоотдачу при лучистом теплообмене, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $T_{\text{ав}}$  – длительно допустимая температура провода, °С;  $T_a$  – температура воздуха, °С;  $\varepsilon_n$  – коэффициент поглощения провода;  $D$  – диаметра провода, м;  $k_H$  – коэффициент, учитывающий влияние высоты над уровнем моря;  $W_p$  – интенсивность суммарной радиации (прямой и отраженной), Вт / м<sup>2</sup>, определяемая в зависимости от времени года по эмпирическим формулам для воздуха разной степени загрязненности;  $\psi_c$  – активный угол наклона солнечных лучей, который зависит от времени года и суток;  $R_{20}$  – сопротивление постоянному току при температуре 20 °С, Ом;  $\beta_r$  – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С;  $k_j$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления за счет поверхностного эффекта;  $k_M$  – коэффициент учета магнитных потерь для проводов со стальным сердечником.

Составляющие параметры модели можно условно разделить на 4 группы:

1 группа – параметры, непосредственно связанные только с конструктивными характеристиками провода (диаметр провода и площадь поверхности теплообмена);

2 группа – параметры, связанные с материалами, из которых изготовлен провод ( $T_{\text{ав}}$ ,  $\beta_r$ ,  $\varepsilon_n$ ,  $R_{20}$ ,  $k_j$ ,  $k_M$ );

3 группа – параметры, зависящие только от климатических факторов и места расположения ВЛ ( $T_a$ ,  $k_H$ ,  $W_p$ ,  $\psi_c$ ).

4 группа – параметры, на которые оказывают влияние как конструктивные особенности провода, так и климатические факторы региона расположения ВЛ ( $P_i$ ,  $\alpha_k$ ,  $\alpha_{\text{л}}$  и величина  $\alpha_r$  – коэффициент теплоотдачи, который является суммой коэффициентов, учитывающих теплоотдачу при конвекции и лучистом обмене).

Поскольку на параметры 3 группы влияет только климато-географическая характеристика района расположения ВЛЭП, и их значения для конкретной ВЛ будет одинаковым как для ВЛ с классическими проводами АС так и с проводами нового поколения, то в статье далее они не рассматриваются. Рассмотрим далее более подробно 1, 2 и 4 группы параметров.

Начнём с первой группы. Размер поперечного разреза провода, т.е. его диаметр, также, как и количество повивов, проволок и их размер являются величинами измеряемыми, которые приводит завод изготовитель в своей документации (каталог продукции, технические условия на изготовление провода и т.д.). Эти конструктивные характеристики провода являются частью исходной информации для расчета.

Площадь поверхности теплообмена является величиной расчетной. В Стандарте ПАО «ФСК ЕЭС»<sup>1</sup> рекомендуется для сталеалюминиевых проводов традиционного исполнения использовать для расчета следующие формулы:

$$F = \pi \cdot d_{\text{пр } \varepsilon} \quad (4)$$

$$d_{\text{пр } \varepsilon} = n_{\text{пров}} \cdot d_{\text{пров}} \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot \arcsin \sqrt{1 - 0,25 \cdot \left( \frac{d_{\text{пров}}}{D - d_{\text{пров}}} \right)^2}}{360} \right) \quad (5)$$

В случае с маркой провода АС для упрощения расчёта на практике используют

<sup>1</sup> СТО 56947007-29.240.55.143-2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. М.: ПАО «ФСК ЕЭС». 2013. 67 с.

выражение:

$$d_{\text{пр } \varnothing} = 1,33 \cdot D \quad (6)$$

где  $n_{\text{пров}}$  – число проволок в наружном повиве провода;  $d_{\text{пр } \varnothing}$  – эквивалентный диаметр провода, учитывающий увеличение поверхности теплообмена за счет витой структуры провода, м;  $d_{\text{пров}}$  – диаметр проволоки, м.

В представленном выше подходе определения площади поверхности теплообмена приходится оперировать диаметрами провода и проволок. Возникает закономерный вопрос, что делать в случае с ПНП, когда форма сечения проволоки не является круглой.

В этом случае кроме эквивалентного диаметра провода можно использовать эквивалентный диаметр проволоки – диаметр круга, площадь которого равна площади поперечного сечения фасонной проволоки. Данную величину можно как рассчитать самостоятельно с помощью геометрических формул, так и взять из конструктивного описания ПНП в каталогах, предоставляемых заводами-изготовителями [14].

В соответствии с техническими условиями на изготовление ПНП определение эквивалентного диаметра проволоки осуществляется через взвешивание 1 метра проволоки провода, расчета его сечения как отношения массы измеренного образца к плотности материала и последующего расчета эквивалентного диаметра.

Параметры 2 группы модели определения длительно допустимого тока можно также разделить на 2 подгруппы:

– неизменные (исходные) –  $T_{av}$ ,  $\beta_r$ ,  $R_{20}$  – расчёт не требуется и значения берутся из данных завода-изготовителя, например из [14];

– изменяемые –  $k_M$ ,  $\varepsilon_n$ ,  $k_j$  – требуется оценка корректности применения значений и/или их расчет. Рассмотрим каждый из них по отдельности.

При помощи коэффициента  $k_M$  учитываются магнитные потери только для проводов со стальным сердечником. Данный коэффициент зависит ещё и от конструктивного исполнения провода, а точнее от количества повивов алюминия поверх стального сердечника. Магнитные потери максимальны для одноповивного провода и минимальны при четном количестве повивов, так как вследствие противоположного направления скрутки смежных повивов в проводах общепринятой конструкции магнитодвижущие силы, действующие в сердечнике и создаваемые токами повивов, частично взаимно компенсируются.

Суть коэффициента можно представить формулой:

$$P_H + P_M = k_M \cdot P_H \quad (7)$$

Рекомендуется принимать следующие значения коэффициента:

$k_M = 1,15$  – для 1-го слоя алюминия;

$k_M = 1,04$  – для 2-х слоев алюминия;

$k_M = 1,10$  – для 3-х слоев алюминия.

Для ПНП со стальными сердечниками применим этот же подход учёта магнитных потерь, а для других ПНП – не будем учитывать  $k_M$ , так как магнитных потерь в этом случае не будет.

Коэффициенты поглощения и излучения провода зависят от материала и состояния поверхности провода. На сегодняшний день нет единого мнения по поводу соотношений между поглотительной и излучательной способностью провода. Принятие значений этих коэффициентов – является очень спорным вопросом. Иногда можно встретить случаи, когда данные коэффициенты приравнивают, но обобщение опыта эксплуатации проводов АС показывает, что коэффициент поглощения выше. По данным [14] для проводов с композитным сердечником в условиях измерения указывается, что коэффициенты поглощения и излучения равны между собой и составляют 0,5. По данным СИГРЭ [15], излучательная и поглотительная способности в начале эксплуатации линии равны 0,2-0,3, а через два года увеличиваются до 0,8 и выше. Для многих ПНП изготовители заявляют срок службы – 50 лет, а коэффициенты поглощения и излучения существенно возрастают уже через два года, то нецелесообразно принимать низкие значения коэффициентов, даже несмотря на все особенности ПНП. Авторы считают целесообразным использовать данные эксплуатации, поскольку основу токопроводящей части проводов в большинстве своём представляет алюминий или его сплавы, и срок эксплуатации ПНП составляет

несколько десятилетий.

Хорошо известно, что активное сопротивление проводника из-за неравномерного распределения тока по сечению повышается. Неравномерное распределение плотности тока по сечению провода носит название поверхностного эффекта. Коэффициент  $k_j$  может иметь несколько наименований: коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления за счет поверхностного эффекта; коэффициент, учитывающий увеличение потерь на переменном токе; коэффициент добавочных потерь. Данный коэффициент отнесен ко второй группе параметров, так как он зависит от конструкции провода и соотношения сечений стального сердечника и алюминиевой части. Резкость проявления его возрастает также при увеличении радиуса провода, магнитной проницаемости и удельной проводимости материала. Для сталеалюминевых проводов диапазон изменения коэффициента варьируется от 1,00 до 1,05. Для проводов без стального сердечника коэффициент примем равным 1,0.

Параметры 4 группы  $\alpha_k$ ,  $\alpha_L$  и  $\alpha_T$  рассчитываются по следующим формулам:

$$\alpha_T = \alpha_k + \alpha_L \quad (8)$$

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{D \cdot k_{\psi}} \quad (9)$$

$$\alpha_L = \frac{5,67 \cdot \epsilon_u}{T_{av} - T_a} \cdot \left[ \left( \frac{273 + T_{av}}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + T_a}{100} \right)^4 \right] \quad (10)$$

где  $\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воздуха (рекомендуемое значение 0,02585 Вт/(м·°C));  $k_{\psi}$  – дополнительный коэффициент учета направления ветра по отношению к проводу;  $\epsilon_u$  – постоянная излучения (степень черноты провода);

$Nu$  – критерий Нуссельта, определяющий коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией, согласно теории подобия, определяется исходя из критериальных уравнений конвективного теплообмена:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) \quad (11)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса, характеризующий вынужденную конвекцию;  $Gr$  – критерий Грасгофа, характеризующий свободную конвекцию;  $Pr$  – критерий Прандтля, характеризующий молекулярные свойства охлаждающей среды.

По наиболее полной модели конвективного теплообмена<sup>2</sup>, которая может быть применена для проводов, критерий Нуссельта представляет собой при свободной конвекции:

$$Nu = 0,46 \cdot Gr^{0,25} \quad (12)$$

при вынужденной конвекции (без учета естественной):

$$\begin{aligned} Nu &= 0,437 \cdot Re^{0,5} \text{ при } 5 \langle Re \leq 10^3 \\ Nu &= 0,218 \cdot Re^{0,6} \text{ при } 10^3 \langle Re \leq 2 \cdot 10^5 \\ Nu &= 0,0201 \cdot Re^{0,8} \text{ при } 2 \cdot 10^5 \langle Re \leq 2 \cdot 10^6 \end{aligned} \quad (13)$$

Из уравнений формулы (13) чаще всего используется второе выражение, первое – используется реже, а третье выражение, как правило, не используется.

Критерий Рейнольдса можно определить:

$$Re = 1,644 \cdot 10^9 \cdot \nu \cdot d_{пр} \cdot (T_a + 273 + 0,5 \cdot (T_{av} - T_a))^{-1,78} \quad (14)$$

где  $\nu$  – скорость ветра, м/с.

Критерий Грасгофа определяется по формуле:

<sup>2</sup> СТО 56947007-29.060.10.006-2008. Методические указания по расчету и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ. М.: ПАО «ФСК ЕЭС». 2008. 64 с.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta_B \cdot d_{\text{пр}}^3 \cdot (\vartheta_{\text{пр}} - T_a)}{\nu_B^2} \quad (15)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\beta_B$  – температурный коэффициент объемного расширения воздуха,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\nu_B$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Для учета совместного действия свободной и вынужденной конвекции применяется эквивалентный критерий Рейнольдса.

Для расчета эквивалентного критерия Рейнольдса при совпадении направлений свободного и вынужденного потоков воздуха используется формула:

$$Re_{\vartheta} = Re + \sqrt{0,5 \cdot Gr} \quad (16)$$

При наличии ветра (т.е. при горизонтальном направлении вынужденного потока) для расчета эквивалентного критерия Рейнольдса используется выражение:

$$Re_{\vartheta} = \sqrt{Re^2 + 0,5 \cdot Gr} \quad (17)$$

Таким образом, при расчете коэффициента теплоотдачи учитываются зависимости характеристик воздуха (коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости, критерий Прандтля) от его температуры, а также совместное действие свободной и вынужденной конвекции.

Последний рассматриваемый параметр – это потери на корону. Его относят к климатическим потерям, зависящим от погодных условий. Влияющими факторами этого типа потерь также являются конструкция фазы, сечение провода и рабочее напряжение. В настоящее время расчет потерь на корону производится по определённым удельным значениям и экспериментальным данным, полученным в ОАО «ВНИИЭ» для ВЛ различных напряжений. Все удельные значения потерь мощности на корону представлены для традиционного исполнения линий с унифицированными опорами и сталеалюминевыми проводами АС.

В существующих методиках теплового расчета провода классических проводников потерями на корону пренебрегают, как указывается, в силу их незначительности. ПНП же и вовсе обладают меньшими значениями потерь на корону по сравнению с проводами АС. Например, благодаря гладкой поверхности проводов АСк2у, на них увеличивается начальное напряжение коронного разряда, что приводит к снижению потерь мощности на корону по сравнению со стандартными витыми проводами марки АС на 40-50 %. Так, для ВЛ напряжением 220 кВ, проходящей в средней полосе России, среднегодовые потери мощности на корону для проводов АСк2у-240/39 могут составить порядка 2,1 кВт/км, в то время как для проводов АС 240/39 они составят 3,85 кВт/км [16]. Важным является то обстоятельство, что для ПНП увеличение начального напряжения коронного разряда для ПНП создаёт предпосылки к снижению минимально допустимого сечения по условию коронного разряда, например, для ВЛЭП 220 кВ допустимое минимальное сечение может снизиться до 185  $\text{мм}^2$  вместо 240  $\text{мм}^2$  для витых проводов [17].

Представим ниже результаты математического расчета основных расчетных параметров.

### Результаты и Обсуждение

Применим рекомендуемый подход расчета  $F$  с помощью формул (3-4) к проводам, представленным в табл. 1 и результаты сведём в табл. 2. Также покажем в табл. 2 отношение эквивалентного диаметра провода к его размерному значению.

Таблица 2

Расчет площади поверхности теплообмена ПНП

| Провод                         | АС 240/39 | AACSR 251 | АСк2у<br>240/39 | АССС <i>Copenhagen</i><br>230 | АСТ<br>240/39 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------------|-------------------------------|---------------|
| $d_{\text{пр } \vartheta}$ , м | 0,029     | 0,026     | 0,025           | 0,023                         | 0,029         |
| $F$ , $\text{м}^2$             | 0,091     | 0,083     | 0,080           | 0,072                         | 0,090         |
| $d_{\text{пр } \vartheta} / D$ | 1,334     | 1,382     | 1,292           | 1,261                         | 1,284         |

Из табл. 2 видно, что в случае ПНП пользоваться упрощённой формулой нельзя,

т.к. соотношение эквивалентного диаметра к диаметру провода разных марок оказалось различным. Однако для ПНП прослеживается та же тенденция, что и для АС – значение эквивалентного диаметра провода получается значительно больше диаметра провода.

Результаты расчета коэффициента теплоотдачи для проводов ПНП покажем в табл. 3 и сравним с данными, приведенными в стандарте электросетевой компании<sup>3</sup>.

Таблица 3

| Провод   | AACSR 251 | АСк2у 240/39 | АССС<br>Copenhagen 230 | АСТ 240/39 |
|--|-----------|--------------|------------------------|------------|
| $\alpha_k$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°С             | 16,714    | 16,468       | 16,633                 | 15,248     |
| $\alpha_d$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°С             | 5,252     | 5,787        | 8,764                  | 9,984      |
| $\alpha_T$ расчетный,<br>Вт/м <sup>2</sup> ·°С | 21,966    | 22,255       | 25,396                 | 25,233     |
| $\alpha_T$                                     | 23,53     | 18,0         | 25,59                  | 18,4       |
| Отклонение, %                                  | -6,6      | +19,1        | -0,8                   | +27,1      |

Знак «минус» по строчке отклонений говорит о том, что расчетная величина меньше справочной, знак «плюс» – наоборот.

Результаты расчета коэффициентов теплоотдачи разнятся с данными стандарта, но являются сопоставимыми. Поскольку для справочного  $\alpha_T$  не показаны исходные данные расчета (температура, скорость ветра и т.д.), то причиной отклонений, по-видимому, может являться разница в этих данных. Безусловно, на результат расчета оказывает влияние и выбор методического подхода к расчету.

В итоге, используя приведенные выше данные, рассчитаем длительно допустимые токи выбранных проводов и результаты расчета сведём в табл. 4.

Для обеспечения сопоставимости результатов климатические параметры приняты следующими: скорость ветра 0,6 м/с, направление ветра перпендикулярно линии, солнечная радиация мощностью 1000 Вт/м<sup>2</sup>, температура окружающего воздуха, принята + 25 °С. Для расчета длительно допустимого тока также учтены потери на корону.

Знак «минус» по строчке отклонений в результатах расчета тока говорит о том, что расчетная величина меньше справочной, знак «плюс» - наоборот.

Для провода традиционной конструкции АС 240/39 и термостойкого провода АСТ 240/39, схожего по конструкции с проводом АС, отклонения результатов расчета от данных заводов-изготовителей находится в пределах +/- 5 %, что говорит о жизнеспособности представленной модели в случае с проводом, выполненным из круглых проволок.

Наибольшие отклонения в отрицательную сторону зафиксированы у проводников, у которых геометрическая форма токопроводящей жилы отлична от круглой, что говорит о необходимости адаптации модели в части расчета площади поверхности теплообмена.

Таблица 4

| Провод                                | АС<br>240/39 | AACSR<br>251 | АСк2у<br>240/39 | АССС<br>Copenhagen 230 | АСТ<br>240/39 |
|---------------------------------------|--------------|--------------|-----------------|------------------------|---------------|
| Длительно допустимый ток, А           | 610,0        | 651,0        | 826,0           | 1024,0                 | 1375,0        |
| Расчётный длительно допустимый ток, А | 635,9        | 573,3        | 764,1           | 1137,0                 | 1332          |
| Отклонение, %                         | +4,0         | -11,9        | -7,5            | +9,9                   | -3,1          |

Для провода с композитным сердечником отклонение находится в пределах 10 %, при этом расчетная величина получается больше справочной.

#### Заключение

На сегодняшний день нет единого утвержденного методического подхода к расчету предельной токовой нагрузки для проводников традиционной конструкции. Данный факт усложняет определение подхода к расчету длительно допустимого тока для ПНП. В то же

<sup>3</sup> СТО 56947007-29.060.50.268-2019. Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения. М.: ПАО «ФСК ЕЭС». 2019. 98 с.

время существующие методики для проводов АС могут быть адаптированы для расчета значений тока для ПНП при условии уточнения расчета параметров и коэффициентов, входящих в его математическую модель расчета, а также оценки степени влияния составляющих модели на итоговый результат.

### Литература

1. Федоров Н.А. Провода нового поколения и вопросы надежности ЛЭП // Материалы международной научно-практической конференции "Работа систем электроснабжения в условиях гололедно-ветровых нагрузок"; 19 октября 2016 г., Уфа.: Изд-во ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», 2016. С. 42-49.
2. Li Z., Zhao Q., Yang B. Analysis on application of new-type aluminum conductor composite core (ACCC) in power transmission line // 2017 EPTC Power Transmission and Transformation Technology Conference; 15-16 March 2017; Chongqing, China. 2017. pp. 1-6.
3. High performance overhead line conductors to upgrade your system. File Library of Nexans. Доступно по: [https://www.nexans.ru/eservice/Russia-ru\\_RU/fileLibrary/Download\\_540306702/Corporate/files/Brochure\\_Overhead\\_Lines\\_2016BD.pdf](https://www.nexans.ru/eservice/Russia-ru_RU/fileLibrary/Download_540306702/Corporate/files/Brochure_Overhead_Lines_2016BD.pdf). Ссылка активна на 24 мая 2020.
4. ACCC High Performance Conductors for a Low Carbon World // Brochure. Доступно по: <https://s3.amazonaws.com/ctc-media/wp-content/uploads/20190420110633/Brochure.pdf>. Ссылка активна на 24 мая 2020.
5. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738–2012 (Revision of IEEE Std 738–2006 - Incorporates IEEE Std 738–2012 Cor 1–2013). 2013. pp. 1-72.
6. CIGRE P. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines // Technical Brochure. 2014. V. 601.
7. Staszewski L., Rebizant W. The differences between IEEE and CIGRE heat balance concepts for line ampacity considerations // Modern Electric Power Systems (MEPS): Proceedings of the International Symposium. 2010. pp. 1-4.
8. Bangay J., Coleman M., Batten R. Comparison of IEEE and CIGRE methods for predicting thermal behaviour of powerlines and their relevance to distribution networks // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. 2015. pp. 1-5.
9. Rahman S.A. and Kopsidas K. Impact of Simplified Convection Model in Overhead Lines Thermal Rating Calculation Methods // 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). 2018. pp. 1-9.
10. Benato R., Caldon R., Chiarelli A., et al. of installing innovative conductors in overhead lines // 2019 AEIT International Annual Conference (AEIT); Florence; Italy. 2019. pp. 1-6.
11. Kenge A.V., Dusane S.V., Sarkar J. Statistical analysis & comparison of HTLS conductor with conventional ACSR conductor // 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT); Chennai; India. 2016. pp. 2955-2959.
12. Varygina A.O., Savina N.V. The Influence of New Functional Properties of Active-Adaptive Electrical Networks on the Correctness of Selection and Verification of Conductor Cross-Sections by Existing Methods // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2018. pp. 1-5.
13. Varygina A.O., Savina N.V. Specification of the Method for Calculating the Long-Term Permissible Current of Overhead Line Conductors. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM); Sochi; Russia. 2020. pp. 1-8.
14. Провода для высоковольтных воздушных линий электропередачи с композитным сердечником марки ACCC. Доступно по: [https://simross.ru/files/35863/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BB2014%20%20ACCC\\_%D0%BF%D1%80.pdf](https://simross.ru/files/35863/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BB2014%20%20ACCC_%D0%BF%D1%80.pdf). Ссылка активна на 24 мая 2020.
15. Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings // CIGRE WG B2.12. 2006.
16. Васюра Ю.Ф., Глазырин М.А., Плешкова Т.А., и др. Оценка экономической целесообразности строительства высоковольтных линий электропередачи с применением проводов нового поколения. Известия вузов. Электромеханика. 2014. №3. С. 71-74.
17. Вихарев А.П., Вильнер А.В. Исследование характеристик коронного разряда для компактированных проводов АЕРО-Z // Сборник материалов Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, наука, инновации» (НПК-2013); 15-16 апреля 2013 г.; Киров. Киров: Из-во ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013. С. 2087-2091.

### Авторы публикации

**Варыгина Александра Олеговна** – аспирант Амурского государственного Университета (АмГУ).

**Савина Наталья Викторовна** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергетика» Амурского Государственного Университета (АмГУ).

### References

1. Fedorov NA. Proveda novogo pokoleniya i voprosy nadezhnosti LEP. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Rabota sistem elektrosnabzheniya v usloviyakh gololedno-vetrovykh nagruzok"*; 19 Oct 2016; Ufa, Russia. Ufa: Publ. Ufa State Aviation Technical University (USATU), 2016. pp. 42-49.
2. Li Z, Zhao , Yang B. Analysis on application of new-type aluminum conductor composite core (ACCC) in power transmission line. *2017 EPTC Power Transmission and Transformation Technology Conference; 15-16 March 2017; Chongqing, China*. 2017. pp.1-6. doi: 10.1049/cp.2017.0548.
3. High performance overhead line conductors to upgrade your system. File Library of Nexans. Available at: [https://www.nexans.ru/eservice/Russia-ru\\_RU/fileLibrary/Download\\_540306702/Corporate/files/Brochure\\_Overhead\\_Lines\\_2016BD.pdf](https://www.nexans.ru/eservice/Russia-ru_RU/fileLibrary/Download_540306702/Corporate/files/Brochure_Overhead_Lines_2016BD.pdf). Accessed: 24 May 2020.
4. ACCC High Performance Conductors for a Low Carbon World // Brochure. Available at: <https://s3.amazonaws.com/ctc-media/wp-content/uploads/20190420110633/Brochure.pdf> Accessed: 24 May 2020.
5. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738–2012 (Revision of IEEE Std 738–2006 – Incorporates IEEE Std 738–2012 Cor 1–2013). 2013. P. 72.
6. CIGRE P. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. Technical Brochure. 2014.V. 601.
7. Staszewski L, Rebizant W. The differences between IEEE and CIGRE heat balance concepts for line ampacity considerations. *Modern Electric Power Systems (MEPS): Proceedings of the International Symposium*. 2010. pp. 1-4.
8. Bangay J, Coleman M, Batten R. Comparison of IEEE and CIGRE methods for predicting thermal behaviour of powerlines and their relevance to distribution networks. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. 2015. pp. 1-5.
9. Rahman SA and Kopsidas K. Impact of Simplified Convection Model in Overhead Lines Thermal Rating Calculation Methods. *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. 2018. pp. 1-9.
10. Benato R, Caldon R, Chiarelli A, et al. assessment of installing innovative conductors in overhead lines. *2019 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Florence; Italy. 2019. pp. 1-6. doi: 10.23919/AEIT.2019.8893409.
11. Kenge AV, Dusane SV, Sarkar J. Statistical analysis & comparison of HTLS conductor with conventional ACSR conductor. *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai; India. 2016. pp. 2955-2959. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755241.
12. Varygina AO, Savina NV. The Influence of New Functional Properties of Active-Adaptive Electrical Networks on the Correctness of Selection and Verification of Conductor Cross-Sections by Existing Methods. *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok; Russia. 2018. pp. 1-5. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602740.
13. Varygina AO, Savina NV. Specification of the Method for Calculating the Long-Term Permissible Current of Overhead Line Conductors. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*; Sochi; Russia. 2020. pp. 1-8. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112085.
14. OHL conductors with a composite core of the ACCC brand. Available at: <https://simross.ru/files/35863/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BB2014%20%20ACCC.%D0%BF%D1%80.pdf>. Accessed: 24 May 2020.
15. Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings // CIGRE WG B2.12. 2006.
16. Vasyura YuF, Glazyrin MA, Pleshkova TA, et al. Otsenka ekonomicheskoi tselesoobraznosti stroitel'stva vysokovol'tnykh linii elektroperedachi s primeneniem provodov novogo pokoleniya. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 2014;3:71-74.

© *A.O. Varygina, H.B. Savina*

17. Vikharev AP, Vil'ner AV. Issledovanie kharakteristik koronnogo razryada dlya kompaktirovannykh provodov AERO-Z. *Sbornik materialov Vserossiiskoi ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obshchestvo, nauka, innovatsii»* (NPK-2013); 15-16 Apr 2013; Kirov, Russia. Kirov Publ. Vyatka State University, 2013. pp. 2087-2091.

#### **Authors of the publication**

*Aleksandra O. Varygina* – Amur State University (AmSU), Blagoveshchensk, Russia.

*Natalya V. Savina* – Amur State University (AmSU), Blagoveshchensk, Russia.

*Поступила в редакцию*

*19 июня 2020г.*



## ВЛИЯНИЕ ОТБОРОВ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

И.И. Мубаракوف, А.Б. Шигапов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ililmub@yandex.ru

**Резюме:** Газотурбинная установка (далее ГТУ) состоит из 5 основных частей: входное устройство, компрессор, камера сгорания, газовая турбина, выходное устройство. В данной работе в связи с отсутствием достаточно обширной информации по стационарным ГТУ, частично были использованы данные из характеристик авиационных ГТУ. На эффективность работы ГТУ влияет множество факторов, среди которых, видимо, определяющим является степень сжатия воздуха в компрессоре  $\pi_K$ . Разумеется, степень сжатия зависит от конструктивной схемы ГТУ, вида топлива, климатических условий эксплуатации и другие. Наиболее важным эксплуатационным параметром ГТУ является полезная мощность  $N_p$  и удельный расход топлива  $b_{уд}$ . В статье дан численный анализ влияния  $\pi_K$  на  $N_p$  и  $b_{уд}$  при вариации температуры газов на входе в турбину  $T_3$ , а также влияние других факторов, среди которых отбор части воздуха на охлаждении высокотемпературных поверхностей конструкции. Выводы были сделаны исходя из расчётов результаты, которых приведены в таблицах, и графиков сравнения полученных результатов.

**Ключевые слова:** ГТУ, оптимальная степень сжатия в компрессоре, полезная мощность, отборы, влияние.

**Для цитирования:** Мубаракوف И.И., Шигапов А.Б. Влияние отборов охлаждающего воздуха на эффективность газотурбинной установки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4. С. 16-23. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-16-23.

## INFLUENCE OF COOLING AIR SELECTIONS ON THE EFFICIENCY OF A GAS TURBINE INSTALLATION

I. Mubarakov, A.B. Shigapov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ililmub@yandex.ru

**Abstract:** A gas turbine installation (GTI) consists of 5 main parts: an input device, a compressor, a combustion chamber, a gas turbine, and an output device. In this work, due to the lack of sufficiently extensive information about stationary GTI, data from the characteristics of aviation GTI were partially used. The GTI operation efficiency is influenced by many factors, among which, apparently, the determining factor is the degree of air compression in the compressor  $\pi_K$ . Of course, the compression ratio depends on the design scheme of the gas turbine, the type of fuel, the climatic conditions of operation, and others. The most important operational parameter of the GTI is the effective power  $N_p$  and specific fuel consumption  $b_{ud}$ . The article provides a numerical analysis of the effect  $\pi_K$  on  $N_p$  and  $b_{ud}$  under variations in the temperature of gases at the turbine inlet  $T_3$ , as well as the influence of other factors, including the selection of part of the air for cooling high-temperature surfaces of the structure. The conclusions were made based on the calculations, the results of which are shown in the tables, and in the comparison graphs of obtained results.

**Key words:** GTI, an optimal compression ratio in the compressor, the effective power, bleed air, influence.

**For citation:** Mubarakov II, Shigapov AB. Influence of cooling air selections on the efficiency of a gas turbine installation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):16-23. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-16-23.

### Введение

При номинальном режиме работы газотурбинной установки мощность газовой турбины превышает потребляемую мощность компрессора. Это является следствием ряда факторов. Определяющим является температура рабочего тела, на входе в турбину  $T_3$  она выше, чем для компрессора  $T_1$ . Дополнительно, некоторое влияние оказывает термодинамического свойства продуктов сгорания. Теплоёмкость газов  $c_{pT}$  выше теплоёмкости воздуха  $c_{pB}$  на 15÷30 %<sup>1</sup>[2,3]. Отношение  $\frac{T_3}{T_1}$  называют степенью подогрева рабочего тела в ГТУ. Степень подогрева рабочего тела современных ГТУ превышает 5 при тенденции постоянного роста [4,5]. В результате удельная работа турбины  $L_T$  больше удельной работы компрессора  $L_K$ . Эту разность называют полезной работой  $L_p$  или при учете расхода рабочего тела полезной мощностью  $N_p$ . Полезная мощность, рассчитываемая таким образом, представляет величину Брутто – поскольку часть полезной работы затрачивается на обслуживание вспомогательных систем контроля, управления, регулирования, жизнеобеспечения [6-8].

Величина полезной мощности  $N_p$  меняется при изменении степени сжатия воздуха в компрессор  $\pi_K$ . Мощность затрачиваемая на привод компрессора непрерывно растет с увеличением  $\pi_K$ . В то же время мощность турбины асимптотический стремится к своему максимальному значению  $N_T = c_{pT} \cdot T_3$ . По этой причине зависимость  $N_p(\pi_K)$  имеет экстремальный характер с максимумом. Степень сжатия воздуха, соответствующая достижению максимума  $N_p$ , называют оптимальной степенью сжатия воздуха в компрессоре  $\pi_{K_{\text{ОПТ}}}$ .

Температура газов перед турбиной  $T_3$  оказывает существенное влияние на оптимальную степень повышения давления в компрессоре  $\pi_K$ , следовательно, и на оптимальное значение степени понижения давления в турбине ГТУ  $\pi_T$ . Аналитические формулы расчёта зависимости  $\pi_{K_{\text{ОПТ}}}(T_3)$  газотурбинной ступени (газогенератора), работающей в составе парогазового блока (ПГБ) выполнены авторами [9] при весьма грубых допущениях. Основные допущения заключается в постоянстве термодинамических свойств рабочего тела, а также отсутствие гидравлических потерь в газодинамическом тракте газотурбинной ступени – в компрессоре, в газоходах, в камере сгорания. Данная формула имеет вид:

$$\pi_{K_{\text{ОПТ}}} = \left( \frac{1 - \eta_{\text{П}}}{\tau} \right)^{\frac{1}{2m}}, \quad (1)$$

где:  $\eta_{\text{П}}$  – КПД паротурбинной пристройки;  $\tau$  – обратная величина степени подогрева рабочего теле в газогенераторе,  $\frac{T_3}{T_1}$ ; комплекс  $m = (k - 1)/k$ . Здесь  $k$  показатель изэнтропических процессов сжатия и расширения, принимается постоянной и равной 1,41. В этой работе отмечено, что учёт реальных свойств рабочего тела компрессора и турбины приводит к большим осложнениям в методах аналитического представления

<sup>1</sup>Уваров В.В. Газовые турбины и газотурбинные установки. М.: Высшая школа, 1970. 320 с. Uvarov V.V. Gazovye turbiny i gazoturbinnye ustanovki. M.: Vysshaya shkola. 1970. 320 p.

модель (формулу) расчета удельной работы неизменной, модифицированный метод сведен к корректировке некоторой эффективной теплоемкости рабочего тела. Приемлемая точность расчетов удельной работы достигается при использовании средне-логарифмического осреднения теплоемкости продуктов сгорания.

Правомерность аналитических представлений  $\pi_{K_{OPT}}$  должна быть подтверждена тепломеханическими расчётами принципиальной тепловой схемы (ПТС). Ниже представлены результаты расчета газотурбинной надстройки – верхней ступени ПГБ, что достигается при принятии в формулах (1), (2), (3)  $\eta_{II} = 0$ .

### Материалы и методы

В первой серии расчётов не учитывалось влияние отбора расходов воздуха на охлаждение нагретых частей газогенератора – камеры сгорания, газоходов и элементов газовой турбины. Расчеты проводились с целью исследования некоторых общих закономерностей рабочих процессов.

В качестве газогенераторной надстройки принята одновальная конструкция. Целевыми функциями оптимизации выбраны полезная мощность и удельный расход топлива. Полезная мощность  $N_p$ , как отмечено выше, представляет разность мощностей газовой турбины  $N_T$  и компрессора  $N_K$ . Удельный расход топлива определяется по соотношению:

$$b_{ud} = G_{воз} / (\xi \alpha G_0 N_p), \quad (4)$$

где  $G_{воз}$  – расход воздуха, кг/с;  $\xi$  – полнота сгорания топлива, равная отношению количества выделившегося в камере сгорания теплоты  $Q$  к низшей теплотворной способности топлива при постоянном давлении  $Q_p^H$ ;  $G_0$  – стехиометрическое (теоретическое) количество воздуха для сгорания одного кг горючего.

Значение  $G_0$  может быть принято для природного газа равным 16,8; для дизельного топлива 14,325 и для солярового масла 14,219.

В общем случае значение  $\pi_{K_{OPT}}(N_p)$  и  $\pi_{K_{OPT}}(b_{ud})$  не совпадают, при этом последнее находится всегда дальше. Однако при оптимизации целесообразно остановить выбор на достижение максимальной полезной работы. Причины такого выбора заключаются в следующем. Во-первых, абсолютное снижение удельного расхода топлива после достижения  $\pi_{K_{OPT}}(N_p)$  небольшое, составляет сотых долей процента. Во-вторых, освоение сложной техники, каковым является многоступенчатый осевой компрессор в область высоких давлений сопряжено большими затратами. Эти затраты не учтены в пределах принятой модели, возможно, их корректный учет вообще невозможен.

При выполнении расчетов использованы аппроксимации термодинамических свойств воздуха и продуктов сгорания. Расчеты проводились по программе, исходный код которой написан на алгоритмическом языке *FORTRAN*, применительно к версии 6.6.0. Программа позволяет выполнять расчеты для газовых турбин, работающих на трех видах топлива: природный газ; дизельное топливо; соляровое масло.

Программа позволяет изменять величины определяющих параметров – входных факторов в широких пределах. В данной серии расчетов приняты:  $\delta_i^*$  – коэффициенты потерь полного давления входного, выходного устройств и камеры сгорания равными 0,97; 0,97; 0,935; коэффициент полноты сгорания топлива  $\xi = 0,98$ ; изоэнтропические коэффициенты полезного действия компрессора  $\eta_{из,к} = 0,865$ ; турбины  $\eta_{из,т} = 0,895$ .

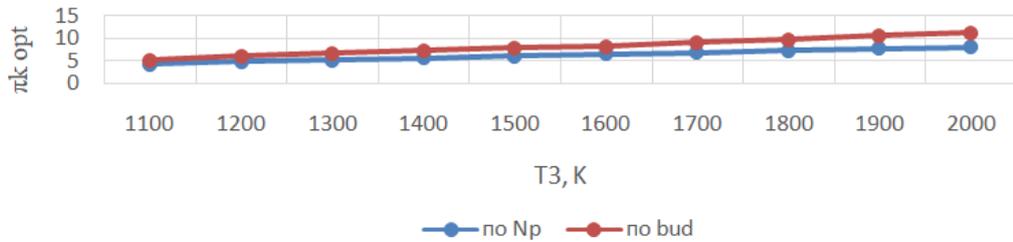
### Результаты

Результаты расчетов для природного газа представлены на рис.1 и сведены в табл. 1, данная зависимость имеет линейный характер. С хорошим приближением ее можно аппроксимировать следующей зависимостью.

Таблица 1

Сравнение оптимального значения степени сжатия по полезной работе ГТУ и по удельному расходу топлива

| $T_3, K$                | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\pi_{K_{OPT}}(N_p)$    | 4,19 | 4,69 | 5,2  | 5,59 | 6,1  | 6,49 | 6,89 | 7,3  | 7,69 | 8,1  |
| $\pi_{K_{OPT}}(b_{ud})$ | 5,2  | 6    | 6,6  | 7,2  | 7,8  | 8,3  | 9,2  | 9,8  | 10,5 | 11,2 |



Представляет научный и практический интерес сопоставление результатов расчета  $\pi_{K_{OPT}}(N_p)$  для различных топлив при равных исходных данных. Такие результаты приведены ниже, табл. 2, рис.2 для природного газа и дизельного топлива при одинаковых температурах газов на входе в турбину.

Таблица 2

Сравнение  $\pi_{K_{OPT}}(N_p)$  для природного газа (п/г) и дизельного топлива (д/т)

| $T_3, K$                    | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\pi_{K_{OPT}}(N_p)$ на п/г | 4,19 | 4,69 | 5,2  | 5,59 | 6,1  | 6,49 | 6,89 | 7,3  | 7,69 | 8,1  |
| $\pi_{K_{OPT}}(N_p)$ на д/т | 4,1  | 4,7  | 5,1  | 5,59 | 6    | 6,4  | 6,7  | 7,09 | 7,5  | 7,8  |

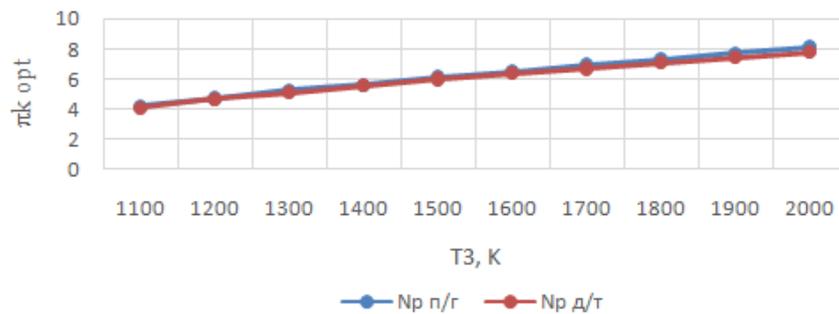


Рис.2. Оптимальные значения степени сжатия воздуха в компрессоре при различных

Как видно из рис.2 оптимальные значения степеней сжатия в компрессоре ГТУ для природного газа несколько превышают значений для дизтоплива при одинаковых температурах продуктов сгорания, причина которого становится понятным при анализе результатов расчета горения топливовоздушной смеси. С увеличением теплоемкости газов, в табл. 3  $c_{pГ}$  имеют размерность  $Kдж/кг*К$ ,  $\pi_{K_{OPT}}(N_p)$  несколько возрастает, причем эффект растет с увеличением температуры газов.

Таблица 3

| $T_3, K$        | 1100  | 1200  | 1300  | 1400  | 1500  | 1600  | 1700  | 1800  | 1900  | 2000  |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $c_{pг}$<br>п/г | 1,2   | 1,224 | 1,249 | 1,273 | 1,297 | 1,321 | 1,346 | 1,372 | 1,399 | 1,429 |
| $k_{г}$<br>п/г  | 1,32  | 1,312 | 1,304 | 1,297 | 1,291 | 1,285 | 1,279 | 1,273 | 1,267 | 1,261 |
| $c_{pг}$<br>д/г | 1,185 | 1,206 | 1,228 | 1,248 | 1,269 | 1,288 | 1,308 | 1,327 | 1,345 | 1,364 |
| $k_{г}$<br>д/г  | 1,319 | 1,312 | 1,305 | 1,298 | 1,291 | 1,286 | 1,28  | 1,275 | 1,27  | 1,265 |

В расчётах также учтено влияние отборов воздуха на охлаждение нагретых частей ГТУ – газохода КС, дисков и лопаток ГТ. К сожалению, в литературе мало информации об использовании воздуха для охлаждения стационарных ГТУ. Имеется довольно обширная информация для авиационных двигателей. Относительная доля воздуха, отводимого на охлаждение  $\delta_{охл} = G_{охл}/G_{voz}$  составляет в них от 4 до 21 % от общего расхода воздуха и зависит в основном от температуры газов на входе в турбину. Аппроксимация зависимости  $\delta_{охл}(T_3)$  может быть представлена формулой (5):

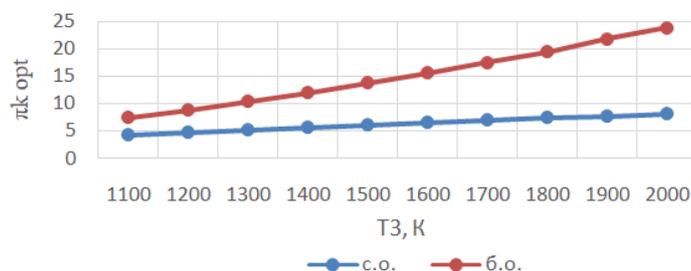
$$\delta_{охл} = 0,00025 \cdot (T_3 - 1400) + 0,04 \quad (5)$$

Ниже, в табл. 4 и рис.3 приведены результаты расчетов, выполненных для природного газа с использованием аппроксимации (5), напомним, что она получена обобщением опыта разработок авиационных двигателей. При использовании авиационных рекомендации, значения  $\pi_{K_{OPT}}$  снижаются примерно в 2 раза (строка с.о) в табл. 4 по сравнению без отбора (б.о) для средних температур, с ростом  $T_3$  отличие еще больше.

Таблица 4

Сравнение оптимального значение степени сжатия в компрессоре без отборов и с отборами (топливо природный газ)

| $T_3, K$             |      | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\pi_{K_{OPT}}(N_p)$ | б.о. | 7,39 | 8,8  | 10,3 | 11,9 | 13,7 | 15,5 | 17,4 | 19,4 | 21,7 | 23,8 |
|                      | с.о. | 4,19 | 4,69 | 5,2  | 5,59 | 6,1  | 6,49 | 6,89 | 7,3  | 7,69 | 8,1  |



### Обсуждение

В практике разработки стационарных газотурбинных установок проблему охлаждения первых ступеней газовой турбины решают несколько по-иному. Поскольку острой необходимости минимизации массовых характеристик двигателя не является актуальным и на ТЭС широко доступным является вода, не использовать ее для охлаждения лопаток турбин было бы не правильным. Ведущие мировые производители стационарных ГТУ: *SIEMENS*, *GE* пошли по пути разработки охлаждаемых водой лопаток первых ступеней газовых турбин, генерируемый пар которых далее используется в качестве рабочего тела в низких ступенях паровых турбин. Японская фирма *Mitsubishi* пошла по пути создания

стационарных ГТУ с использованием лопаток с термобарьерными покрытиями, надежно функционирующих ГТУ с температурой газов на входе в турбину 1700-1800° С, фирма считает преодоленной. Поскольку в данном случае выполнение рекомендации (5) являются неразумными, анализ влияния относительной доли охлаждающего воздуха при ее произвольной вариации имеет значение для практики, ниже табл. 5 и рис.4 приведены результаты расчетных исследований.

Таблица 5

Влияние отборов на оптимальное значение степени сжатия в компрессоре при определенных температурах перед турбиной T<sub>3</sub>

| T <sub>3</sub> = 1500 К |      |      |      |      | T <sub>3</sub> = 1600 К |      |      |      |          |
|-------------------------|------|------|------|------|-------------------------|------|------|------|----------|
| $\pi_{КОПТ}$            | 6,2  | 6,1  | 6    | 5,9  | 6,59                    | 6,5  | 6,4  | 6,3  | 6,2      |
| $\delta_{ОХЛ}$          | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,08                    | 0,09 | 0,1  | 0,11 | 0,12     |
| T <sub>3</sub> = 1700 К |      |      |      |      |                         |      |      |      |          |
| $\pi_{КОПТ}$            | 6,8  | 6,7  | 6,6  | 6,5  | 6,4                     | 6,3  | 6,2  | 6,1  | 6        |
| $\delta_{ОХЛ}$          | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,16                    | 0,17 | 0,18 | 0,19 | 0,2-0,21 |

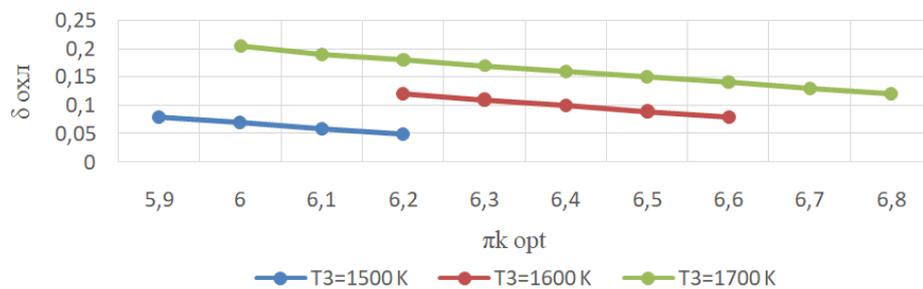


Рис.4. Влияние отборов на оптимальное значение степени сжатия в компрессоре

Также был проведен анализ влияние других факторов. При проведении расчетов были взяты следующие значения: потери полного давления в проточной части газогенератора, изэнтропический КПД компрессора и турбины. Анализ показал то, что влияние этих факторов несущественны.

**Выводы**

Оптимальное значение степени сжатия воздуха в компрессоре зависит от вида топлива. Причем это влияние имеет большое значение при высоких температурах газов на входе в турбину.

Отбор воздуха на охлаждение приводит к снижению оптимального значения степени сжатия воздуха в компрессоре. Эффект более существенен при высоких температурах.

Влияние гидродинамических потерь в проточных частях ГТУ, а также КПД турбины и компрессора на оптимальное значение степень сжатия воздуха в компрессоре пренебрежимо мало.

**Литература**

1. Уваров В.В. Газовые турбины и газотурбинные установки. М.: Высшая школа, 1970. 320 с.
2. Шигапов А.Б. Стационарные газотурбинные установки тепловых электрических станций. Казань: Изд. КГЭУ. 2006. 316 с.
3. Al-Sood M. M.A., Matrawy K.K., Abdel-Rahim Y.M. Optimum operating parameters of an irreversible gas turbine cycle // Journal of Engineering Sciences, Assiut University. 2016. V. 40. № 6. pp.1695-1714.
4. Nkoi B. Advanced Cycles Large-Scale Aero-Derivative Gas Turbines: Performance Comparison / B. Nkoi et al. // Journal of Power and Energy Engineering. 2016. V. 4. №. 05. pp. 7-19.
5. Linstrom P.J and Mallard W.G. Eds., NIST Chemistry Web Book, NIST Standard Reference Database Number 69, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899, <http://webbook.nist.gov>. Accessed to: October 12, 2015.
6. Хасанов Н.Г., Шигапов А.Б. Оптимальная степень сжатия воздуха в газотурбинной установке с промежуточным воздухоохладителем // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. №1-2. С. 108-118.

7. Carl Knopf. Modeling, Analysis and Optimization of Process and Energy Systems. John Willey & Sons, New Jersey, 2012. 488 p.
8. Philip J Thomas. Simulation of industrial Process for Control Engineers, London, Butterworth-Heinemann 1999. 390 p.
9. Arora R., Kaushik S.P., Kumar R. Performance analysis of Brayton heat engine at maximum efficient power using temperature dependent specific heat of working fluid // Journal of Thermal Engineering. 2015. V.1. №. 2. P. 345354.
10. Шигапов А.Б., Кутлубаев И.Т. Расчетные формулы основных показателей парогазовых блоков с учетом реальных параметров рабочих тел. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. №(1-2). С. 26-32.
11. Закиров М.У., Локай В.И., Сальников Г.М. Термодинамические расчёты в турбомашинах с учётом переменной теплоемкости рабочего тела. Казань: Изд. Каз. авиац. инст.-т., 1976, 91 с.
12. Sabine Ausmeier. Innovative Gasturbinen-Prozesse zur Steigerung von Wirkungs – grad und Wirtschaftlichkeit. Dissertation zur Erlangung des Akademischen Grades Doktor-Ingenieurin. Essen, 08. Oktober 2002.
13. Hayhurst A.N., Vince I.M. Nitric Oxide Formation from N<sub>2</sub> in Flames: the importance of prompt NO/ Prog. Energy Combust Sci. 1980.V 6.
14. Хасанова Н. Г. «Изменения термодинамических свойств в тракте ГТУ». Дисс. ....2018.
15. Хасанов Н.Г., Шигапов А.Б. Влияние неидеальности рабочих тел на оптимальную степень повышения давления в компрессоре ГТУ с промежуточным охлаждением циклового воздуха // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 10. С. 472-479.

### Авторы публикации

**Мубаракوف Ильясф Ильнурович** – студент магистерского отделения кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМС), Казанский государственный энергетический университет.

**Шигапов Айрат Багаутдинович** – д-р т. н., профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМС), Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Uvarov VV. *Gazovyeturbiny i gazoturbinye ustanovki*. M.: Vysshaya shkola, 1970. 320 p.
2. Shigapov AB. *Statsionarnye gazoturbinye ustanovki teplovykh elektricheskikh stantsii*. Kazan': Izd. KGEU. 2006. 316 p.
3. Al-Sood MA, Matrawy KK, Abdel-Rahim YM. Optimum operating parameters of an irreversible gas turbine cycle. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*. 2016;40(6):P.1695-1714.
4. Nkoi B. Advanced Cycles Large-Scale Aero-Derivative Gas Turbines: Performance Comparison. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2016;4(05):7-19.
5. Linstrom PJ and Mallard WG. Eds., NIST Chemistry Web Book, NIST Standard Reference Database Number 69, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899, <http://webbook.nist.gov>. Accessed to: October 12, 2015.
6. Khasanov NG, Shigapov AB. Optimal'naya stepen' szhatiya vozdukha v gazoturbinoi ustanovke s promezhutochnym vozdukhookhladitelem. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2017;1-2:108-118.
7. Carl Knopf. *Modeling, Analysis and Optimization of Process and Energy Systems*. John Willey & Sons, New Jersey, 2012. 488 p.
8. Philip J Thomas. *Simulation of industrial Process for Control Engineers*. London, Butterworth-Heinemann 1999. 390 p.
9. Arora R, Kaushik SP, Kumar R. Performance analysis of Brayton heat engine at maximum efficient power using temperature dependent specific heat of working fluid. *Journal of Thermal Engineering*. 2015;1(2):345354.
10. Shigapov AB, Kutlubayev IT. Raschetnye formuly osnovnykh pokazatelei parogazovykh blokov s uchetom real'nykh parametrov rabochikh tel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2015;(1-2):26-32
11. Zakirov MU, Lokai VI, Sal'nikov GM. *Termodinamicheskie raschety v turbomashinakh s uchetom peremennoi teploemkosti rabochego tela*. Kazan': Izd. Kaz. aviats. inst.-t., 1976, 91 s.
12. Sabine Ausmeier. *Innovative Gasturbinen-Prozesse zur Steigerung von Wirkungs – grad und Wirtschaftlichkeit*. Dissertation zur Erlangung des Akademischen Grades Doktor-Ingenieurin. Essen, 08. Oktober 2002.
13. Hayhurst AN, Vince IM. Nitric Oxide Formation from N<sub>2</sub> in Flames: the importance of prompt NO/ Prog. Energy Combust Sci. 1980 V. 6.

14. Khasanova NG. *Izmeneniya termodinamicheskikh svoistv v trakte GTU* [dissertation. ...]

15. Khasanov NG, Shigapov AB. Vliyaniye neideal'nosti rabochikh tel na optimal'nuyu stepen' povysheniya davleniya v kompressore GTU s promezhutochnym okhlazhdeniem tsiklovogo vozdukhа. *Teplovye protsessy v tekhnike*. 2017;9(10):472-479.

**Authors of the publication**

*Ilsaf I. Mubarakov* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: ililmub@yandex.ru.

*Ayrat B. Shigapov* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Поступила в редакцию*

*06 июня 2020г.*



## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА ЖИДКОМ ТОПЛИВЕ

В.Г. Злобин, Л.О. Зверев

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (СПбГУПТД),  
Высшая школа технологии и энергетики, г. Санкт-Петербург, Россия  
zlobin\_v@list.ru

**Резюме:** Вопросам экономии топливно-энергетических ресурсов, а также повышения эффективности оборудования придается большое значение во всех отраслях и особенно в энергетике-основной топливо-потребляющей отрасли. Повышение эффективности работы котельных установок и в настоящее время остается актуальным вопросом. На каждой станции разрабатываются организационно-технические мероприятия по совершенствованию технологических процессов.

В статье рассмотрены некоторые пути повышения эффективности котельных установок при использовании жидкого топлива. Проведены тестовые промышленные испытания очистителя форсунок на дизельном топливе в котельной установке, которые привели к следующим результатам:

– получена экономия расхода топлива 8,67 %. При этом количество передаваемого тепла в сеть ЛТЦ-4 увеличилось на 5,67 %.

– удельный показатель расхода топлива (отношение расхода дизельного топлива к количеству передаваемого тепла, кг/Гкал) снизился на 12,57 %, а также одновременно с показателями экономичности котлов, возрастут ресурсные показатели форсунок котлов, снизится время и уменьшатся затраты на технический осмотр форсунок.

**Ключевые слова:** эффективность, жидкое топливо, котельная, очиститель, форсунка, экономия, расход топлива.

**Для цитирования:** Злобин В.Г., Зверев Л.О. Повышение эффективности котельных установок на жидком топливе // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4 С. 24-31. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-24-31.

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF LIQUID FUEL BOILER PLANTS

VG. Zlobin, LO. Zverev

Graduate School of Technology and Energy SPbGUPTD  
St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract:** The issues of saving fuel and energy resources, as well as improving the equipment efficiency, are of great importance in all sectors and especially in the energy sector, the main fuel-consuming industry. Improving of the boiler plants efficiency and is currently an urgent issue. Organizational and technical measures to improve technological processes are being developed at each station.

The article discusses several ways to improve the boiler plants efficiency using liquid fuel. Industrial tests of the diesel nozzle cleaner in the boiler plant were carried out, which led to the following results:

- received fuel consumption savings of 8.67%. At the same time, the amount of heat transferred to the LTC-4 network increased by 5.86%.

- the specific indicator of fuel consumption (the ratio of diesel fuel consumption to the amount of heat transferred, kg / Gcal) decreased by 12.57%, and also at the same time as the efficiency of the boilers, the resource indicators of the boiler nozzles will increase, the time and the costs for the nozzles technical inspection will decrease.

**Keywords:** efficiency, liquid fuel, boiler plant, cleaner, nozzle, economy, fuel consumption.

**For citation:** Zlobin VG, Zverev LO. Investigation of the plane wave coupling to a linearly loaded transmission line network. *Power engineering: research, equipment, technology*.2020;22(4):24-31. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-24-31.

### **Введение**

В настоящее время объем потребления энергии непрерывно возрастает, что является следствием процесса индустриализации и увеличения энергозатрат на добычу природных ресурсов [1-4].

Несмотря на развитие топливобывающей промышленности в нашей стране, топливный баланс ее в течение многих лет является весьма напряженным: опережающими темпами растет потребность в топливе, и зачастую оно расходуется расточительно. Сегодня Россия в расчете на единицу национального дохода расходует топлива, электроэнергии, металла и других ресурсов более чем в 2 раза больше, чем экономически развитых странах [5-7].

Исходя из этого, на котельных существует потребность в увеличении эффективности котельных установок и достигается это опытным путём.

### **Литературный обзор**

Очистка топливной системы, и в том числе форсунок, представляет собой серьезную проблему. Связана она с целым рядом аспектов, а главной причиной появления загрязнений всегда становится низкое качество топлива. Загрязнение распылительных отверстий форсунок ухудшает образование топливоздушную смеси, в регуляторе давления нарушается герметичность, а в топливном насосе высокого давления существенно уменьшается производительность. К примеру, слой отложений на форсунках толщиной 5мкм может изменить пропускную способность этого канала на 25%. Для унижения степени загрязнения форсунок при эксплуатации применяются методы: совершенствуют конструкцию форсунок, применяют новые материалы, достигают очень высокой точности изготовления, используют очищающие жидкости. Большое количество специальных исследований, испытаний и многолетний опыт эксплуатации показали, что при хорошем состоянии топочных форсунок и их регистров, и правильной организации топочного процесса, работа топков с избытком воздуха 1,05-1,1 вполне возможна без значительной потери от химического недожога и при уменьшенной потере с уходящими газами при этом значительно уменьшаются затруднения из-за загрязнения и коррозии поверхностей нагрева, удлиняется срок работы между остановками для ремонта и очистки, снижается расход топлива, себестоимость пара и электроэнергии [8-11].

### **Материалы и методы**

В ООО «Леноблтеплоснаб» была проведена тестовая обработка дизельного топлива котельной установки STAVAN-250 № 2 котельной ЛТЦ-4 д. Иссад Волховского района Ленинградской области присадкой «Очиститель форсунок котлов «Супротек».

До выполнения тестовой обработки дизельного топлива для котельной установки STAVAN-250 №2, был согласован с руководством котельного участка и оператором котельной, порядок регистрации параметров работы котельной установки STAVAN-250 №2 4 (четыре) раза в сутки (08-00, 12-00, 16-00, 20-00); разработан и согласован с руководством котельного участка и оператором котельной порядок обработки дизельного топлива в резервной емкости и подачи его в расходный бак.

Тестовые испытания проводились по следующей методике:

В резервный бак с двумя тоннами дизельного топлива через горловину бака заливается три литра «Очистителя форсунок котлов «Супротек» и тщательно перемешивается.

В момент, когда в расходном баке останется одна тонна дизельного топлива, расходный бак пополняется из резервного бака, так, чтобы общая масса топлива в расходном баке составила 3 тонны. При этом достигается требуемая концентрация «Очистителя форсунок котлов «Супротек» из расчета 1 литр очистителя на 1 тонну дизельного топлива.

Регистрация параметров работы котельной установки проводилась в штатном режиме в «Журнале учета работы котельной» в течение всего периода тестовой обработке. Начало перекачки обработанного дизельного топлива с резервного бака в расходный фиксировалась в журнале одномоментно. С этого времени считалось, что котельная установка начала работу на дизельном топливе с «Очистителем форсунок котлов «Супротек».

В период тестовой обработки настройки и регулировки форсунки «Ecoflam» котла, насосов и другого вспомогательного оборудования не менялись.

При регистрации параметров работы котельной до и в процессе обработки используются штатные средства измерения температуры окружающего воздуха, температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе, а также уровня дизельного топлива в расходном баке.

Целесообразность и уровень снижения расхода дизельного топлива определялась путем прямого сравнения показателей работы котельной до и после обработки дизельного топлива «Очистителем форсунок котлов «Супротек»».

По окончании испытания был произведён расчет количества тепла, передаваемого в сеть.

Расчет количества тепла, передаваемого в сеть, произведен по формуле:

$$Q = G \cdot C_p (t_{\text{под}} - t_{\text{обр}}),$$

где  $G$  – подача насоса теплоносителя в сеть (из графика характеристики насоса ВРН 120/340.65Т (рис.1),  $G = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $C_p$  – теплоемкость теплоносителя,  $C_p = 1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_{\text{под}}$  – температура в подающем трубопроводе от насоса в сеть,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{обр}}$  – температура в обратном трубопроводе из сети,  $^\circ\text{C}$ .

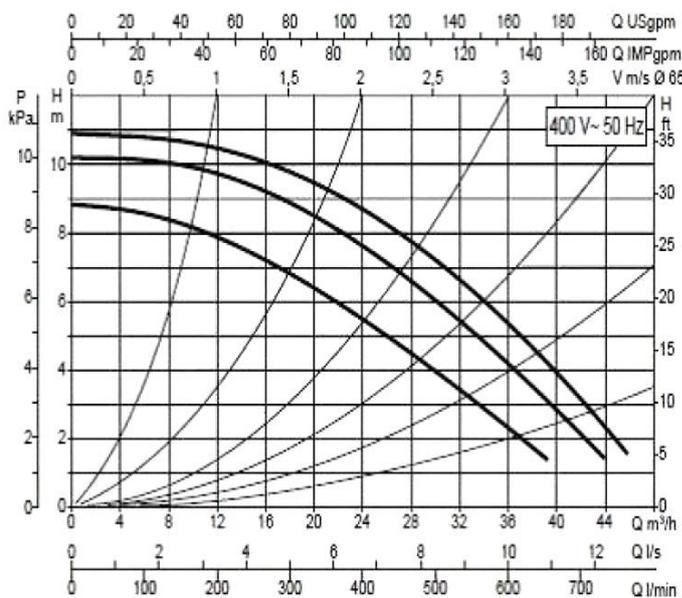


Рис.1. Характеристика насоса ВРН 120/340.65Т

### Обсуждение результатов

В результате обработки данных построены температурные графики котельной – зависимость расхода дизельного топлива и количества передаваемого тепла в сеть от температуры наружного воздуха. На графиках представлены зависимости расхода дизельного топлива и количества теплоты, передаваемой в сеть, за период тестовой обработки (рис. 2, 3), а также изменение удельного расхода топлива котельной (рис. 4).

### Изменение расхода дизельного топлива в котельной ЛТЦ-4



### Изменение количества передаваемого тепла в котельной ЛТЦ-4



Таким образом, в результате прямого сравнения показателей работы котельной до и после обработки дизельного топлива «Очистителем форсунок котлов «Супротек» получена экономия расхода дизельного топлива – 8,67 %.

Количество передаваемого тепла в сеть ЛТЦ-4 увеличилось на 5,67 %.

Изменение удельного расхода топлива в котельной ЛТЦ-4

Разница составляет  $\Delta = -12,57\%$



Расчет изменений расхода дизельного топлива, количества тепла, передаваемого в сеть и удельного расхода топлива представлен в табл. 1.

Таблица 1

Расчет изменения расхода дизтоплива, количества тепла, передаваемого в сеть, %

| 2                                      | 1      | 0      | -1     | -2     | -3     | -4     | Температура наружного воздуха, °C |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------------|--------|
| Изменение количества тепла, %          |        |        |        |        |        |        |                                   |        |
| 1,8                                    | 2,12   | 1,84   | 2,16   | 2,2    | 2,04   | 2,28   | без присадки                      |        |
| 2,16                                   | 1,92   | 1,92   | 2,16   | 2,4    | 2,16   | 2,4    | с присадкой                       |        |
| 20,00                                  | -9,43  | 4,35   | 0,00   | 9,09   | 5,88   | 5,26   | среднее, %                        | +5,86  |
| Изменение расхода топлива, %           |        |        |        |        |        |        |                                   |        |
| 243                                    | 24     | 243    | 270    | 270    | 243    | 270    | без присадки                      |        |
| 216                                    | 216    | 216    | 216    | 297    | 243    | 270    | с присадкой                       |        |
| -11,11                                 | -11,11 | -11,11 | -20,00 | 10,00  | 0,00   | 0,00   | среднее, %                        | -8,67  |
| Изменение удельного расхода топлива, % |        |        |        |        |        |        |                                   |        |
| 135,00                                 | 114,62 | 132,07 | 125,00 | 122,73 | 119,12 | 118,42 | без присадки                      |        |
| 100                                    | 112,5  | 112,5  | 100,00 | 123,75 | 123,75 | 12,5   | с присадкой                       |        |
| -25,93                                 | -1,85  | -14,81 | -20,00 | 0,83   | 3,89   | -5,00  | среднее, %                        | -12,57 |

Удельный показатель расхода топлива (отношение расхода дизельного топлива к количеству передаваемого тепла, кг/Гкал) снизился на 12,57 %. Данное снижение косвенно подтверждает расчет суммарного удельного расхода топлива за декабрь-февраль 2018 до обработки и суммарного удельного расхода топлива за период обработки с 04 по 14 февраля 2019 г. Данные представлены в табл. 2. В результате получено снижение удельного расхода топлива на 11,61 %.

| Расчет суммарного удельного расхода топлива за периоды |               |                    |   |                                       |
|--|---------------|--------------------|---|---------------------------------------|
| Период расчета   | Расход ДТ, кг | Тепло в сеть, Гкал | Суммарный удельный расход до обработки, кг/Гкал | Снижение удельного расхода топлива, % |
| За период до обработки декабрь 2018 г.-февраль 2019 г. | 18792,00      | 148,40             | 126,63  |                                       |
| За период обработки 04-14 февраля 2019 г.              | 2646,00       | 23,64              | 111,93  | -11,61                                |

### Заключение

По результатам, полученным в ходе выполнения тестовой обработки дизельного топлива в котельной ЛТЦ-4 д. Исследованы следующие выводы:

1. В результате прямого сравнения показателей работы котельной до и после обработки дизельного топлива «Очистителем форсунок котлов «Супротек» получена экономия расхода топлива 8,67 %. При этом количество передаваемого тепла в сеть ЛТЦ-4 увеличилось на 5,67 %.

2. Удельный показатель расхода топлива снизился на 12,57 %.

Таким образом, эффективность добавления в дизельное топливо «Очистителя форсунок котлов «Супротек» состоит в снижении расхода дизельного топлива на 7÷8 % при одновременном увеличении количества тепла, передаваемого в сеть. Удельные показатели расхода топлива снижаются на 10÷12 %, а также одновременно с показателями экономичности котлов, возрастут ресурсные показатели форсунок котлов, снизится время и уменьшатся затраты на технический осмотр форсунок.

### Литература

1. Плаксин А.М., Гриценко А.В., Глемба К.В., и др. Диагностирование электромагнитных форсунок по изменению качественного состава топливной смеси // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11. С. 2380-2384.
2. Oliskewych M., Bochenski C., Majewski Z.A Method of designing the diagnostic test for a dies el engine injection system // *Ann. Warsaw Agr.Univ.Agr.* 2001. N.40. pp. 17-23.
3. Vieweg F., Verlagsges mbH S. Das Common Rail System, ein neues Kapitel der Deseleinspritztechnik // *Motortechnische Zeitschrift*. 1997. N.10. pp. 574-575.
4. Vier Ventile, Common Rail // *DLZ Agrarmag.AgroBonus*. 2002. V.53. N.12. pp. 63-130.
5. Зверева Э.Р., Дмитриев А.В., Шагеев М.Ф., и др. Результаты промышленных испытаний карбонатной присадки к мазуту // *Теплоэнергетика*. 2017. №8. С. 50-56.
6. Марков В.А., Девянин С.Н., Тихонов А. В. Влияние конструкции распылителя форсунки на показатели транспортного дизеля // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2004. №1. С. 60-81.
7. Малахов А.Ю., Юрин П.А., Лихачева Т.Е., и др. Исследование причин выхода из строя топливных форсунок современных автомобилей // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2017. №4(51). С. 38-47.
8. Лазарев В.Е., Ломакин Г.В., Лазарев Е.А. Совершенствование конструкции распылителей топливной форсунки дизеля для реализации повышенных давлений впрыскивания топлива // *Ползуновский Вестник*. 2017. №4. С. 70-75.
9. Kyshchun V., Nesterenko I. Diagnostic methods of diesel fuels spray nozzle with piezoelectric driver // *Наукові нотатки*. 2018. №61. pp. 77-82.
10. Неговора А.В., Махиянов У.А., Костарев К.В. Совершенствование технологии ремонта форсунок автотракторных дизелей // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2015. №3 (35). С. 64-68.
11. Мильман О.О., Ленев С.Н., Голов П.В., и др. Исследование режима работы сухой вентиляторной градирни на ТЭЦ-12 ПАО "Мосэнерго" // *Теплоэнергетика*. 2020. №4. С. 41-51
12. Огнев И. И., Огнев И. Г., Брусницын Ф.А., и др. Анализ влияния параметров форсунок на показатели дизельного двигателя // *Труды Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию кафедры подъемно-транспортных машин и роботов "Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта"*; 06 декабря 2019 г., Екатеринбург, Россия.

Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2020. С. 50-52.

13. Солдатова М.С. Разработка приложения для выделения процесса распыления жидкости форсунки на изображении // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. №4 (14). С. 173-175.

14. Савастенко Э.А., Яковенко А.Л., Савастенко А.А. Использование ультразвукового метода очистки деталей топливной аппаратуры дизеля // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2018. №4(55). С. 22-27.

15. Thiemann W., Finkbeiner H., Brüggemann H. Der neue Common-Rail-Dieselmotor mit Direkteinspritzung für den Smart. 1999. MTZ Motortech. N.60. pp. 722-733. <https://doi.org/10.1007/BF03226535>.

### Авторы публикации

**Злобин Владимир Германович** – канд. техн. наук, зав. кафедрой «Теплосиловые установки и тепловые двигатели» Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, г. Санкт-Петербург.

**Зверев Леонид Олегович** – студент Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, г. Санкт-Петербург.

### References

1. Plaksin AM, Gritsenko AV, Glemba KV, et al. Diagnostirovaniye elektromagnitnykh forsunok po izmeneniyu kachestvennogo sostava toplivnoy smesi. *Fundamen-tal'nyye issledovaniya*. 2014;11:2380-2384.

2. Oliskewych M., Bochenski C., Majewslci Z. A Method of designing the diagnostic test for a dies el engine injection system. *Ann. Warsaw Agr. Univ. Agr.* 2001;40:17-23.

3. Vieweg F, Verlagsges mbHS. Das Common Rail System, ein neues Kapitel der Dieseleinspritz-technik. *Motortechische Zeitschrift*. 1997;10:574-575.

4. Vier Ventile, Common Rail. *DLZ Agrarmag. AgroBonus*. 2002;53(12):63-130.

5. Zvereva ER, Dmitriev AV, Shageev MF, et al. Results of industrial tests of carbonate additive to fuel oil. *Thermal Engineering*. 2017;64 (8):591-596.

6. Markov VA, Devyanin SN, Tikhonov AV. Vliyaniye konstruksii raspylitelya forsunki na pokazateli transportnogo dizelya. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye*. 2004;1:60-81.

7. Malakhov AYU, Yurin PA, Likhacheva TYe, et al. Is-sledovaniye prichin vykhoda iz stroya toplivnykh forsunok sovremennykh avtomo-biley. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2017; 4(51):8-47.

8. Lazarev VYe, Lomakin GV, Lazarev YeA. Sovershenstvovaniye konstruksii ras-pyliteley toplivnoy forsunki dizelya dlya realizatsii povyshennykh davleniy vpryskivaniya topliva. *Polzunovskiy Vestnik*. 2017; 4:70-75.

9. Kyshchun V, Nesterenko I. Diagnostic methods of diesel fuels spray nozzle with piezoe-lectric driver. *Scientific Notes*. 2018;61:77-82.

10. Negovora AV, Makhyanov UA, Kostarev KV. Improving the technology of repairing nozzles of automotive diesel engines. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2015;3(35):64-68.

11. Mil'man OO, Lenev SN, Golov PV, et al. Investigation into Operating Conditions of a Dry Mechanical Draft Cooling Tower at the TETs-12 Cogeneration Power Station of PAO Mosenergo. *Thermal Engineering*. 2020;4:41-51.

12. Ognev II, Ognev IG, Brusnitsin FA, et al. Analiz vliyaniya parametrov forsunok na pokazateli dizel'nogo dvigatelya. In: Pyatayev MV, Zyryanov AP. *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 90-letiyu kafedry pod"-yemno-transportnykh mashin i robotov "innovatsionnoye razvitiye tekhniki i tekhnolo-giy nazemnogo transporta"*; 06 dekabrya 2019; Yekaterinburg, Rossiya. Yekaterinburg: Ural'skiy federal'nyy universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. Yel'tsina, 2020. pp. 50-52.

13. Soldatova MS. Razrabotka prilozheniya dlya vydeleniya protsessa raspyleniya zhidkosti forsunki na izobrazhenii. *Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2018;4(14):173-175.

14. Savastenko EA, Yakovenko AL, Savastenko AA. Ispol'zovaniye ul'trazvukovogo metoda ochistki detaley toplivnoy apparatury dizelya. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2018;4(55):22-27.

15. Thiemann W, Finkbeiner H, Brüggemann H. Der neue Common-Rail-Dieselmotor mit Direkteinspritzung für den Smart. *MTZ Motortech*. 1999;60:722–733. <https://doi.org/10.1007/BF03226535>.

**Authors of the publication**

***Vladimir G. Zlobin*** – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia. Email: zlobin\_v@list.ru.

***Leonid O. Zverev*** – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia.

***Поступила в редакцию***

***03 августа 2020г.***



## О НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ПОНЯТИЯ ЭНТРОПИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

В.Г. Киселёв

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, РоссияORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2308-1598>, [kis\\_vg@mail.ru](mailto:kis_vg@mail.ru)

**Резюме:** в статье на базе новой модели идеального газа и теории термодинамических потенциалов рассмотрены изотермические и адиабатические процессы, протекающих в нём. Кроме того, произведён разбор процесса введения понятия энтропии Р. Клаузиусом, в результате чего установлены основные требования, предъявляемые им к энтропии, изменения которой наблюдаются в изотермических и адиабатических процессах, в частности, выявлено, что, если в изотермических процессах с участием одного моля идеального газа энтропия  $S_T$  однозначно характеризуется величиной  $S_T = R \ln V$ , то при протекании процессов адиабатических, единственным требованием предъявляемым к ним является условие о взаимоуничтожении адиабат в рассматриваемом цикле Карно. В результате данного обстоятельства фактически в термодинамике используют различные «адиабатические» энтропии, а именно  $S_A = \text{const } R \ln V$  и  $C_v \ln T$ , а в рамках данной работы и  $C_v$ , что приводит, не смотря на математически безупречное введение понятия энтропии для цикла Карно к невозможности её однозначной интерпретации и, следовательно, определению её физико-химического смысла даже для идеального газа. В работе введено новое понятие «суммарная» энтропия идеального газа  $S_\Sigma = R \ln V + C_v$ , удовлетворяющая критериям Р. Клаузиуса, на базе которой установлено, что данный вид энтропии, умноженный на абсолютную температуру характеризует некий уровень потенциальной энергии системы, который может быть последовательно преобразован в работу в изотермическом обратимом процессе, при подводе соответствующего количества тепла и в соответствующем адиабатическом обратимом процессе.

**Ключевые слова:** энтропия, термодинамические потенциалы, энергия Гиббса, энергия Гельмгольца, теорема Карно, цикл Карно, идеальный газ, изотермический процесс, адиабатический процесс, химическая энергия, квазистатический процесс, обратимый процесс.

**Для цитирования:** Киселёв В.Г. О неоднозначности понятия энтропия идеального газа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4 С. 32-42. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-32-42.

## ON THE AMBIGUITY OF THE CONCEPT OF IDEAL GAS ENTROPY

VG. Kiselev

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2308-1598>, [kis\\_vg@mail.ru](mailto:kis_vg@mail.ru)

**Abstract:** based on a critical analysis of the existing characteristics of an ideal gas and the theory of thermodynamic potentials, the article considers its new model, which includes the presence of an ideal gas in addition to kinetic energy of potential (chemical) energy, in the framework of which the isothermal and adiabatic processes in it are studied both reversible and irreversible, in terms of changes in the entropy of the system in question, observed in case. In addition, a critical analysis was made of the process of introducing the concept of entropy by R. Clausius, as a result of which the main requirements for entropy were established, the changes of which are observed in isothermal and adiabatic quasistatic processes, in particular, it was revealed that if in isothermal processes involving one in a perfect gas, the entropy  $S_T$  is uniquely characterized by the value  $S_T = R \ln V$ , regardless of whether the process is reversible or not, then when the adiabatic processes occur, the only requirement made of them is the condition of mutual destruction

adiabats in this Carnot cycle. As a result of this circumstance, in fact, in thermodynamics various "adiabatic" entropies are used, namely;  $S_A = \text{const}$ ,  $R \ln V$  and  $C_V \ln T$ , and in addition, as established in this paper,  $C_V$ , which leads, despite the mathematically perfect introduction of the concept of entropy for the Carnot cycle, to the impossibility of its unambiguous interpretation and, therefore, the determination of its physicochemical meaning even for perfect gas. A new concept is introduced in the work: "total" entropy of an ideal gas  $S_\Sigma = R \ln V + C_V$ , satisfying the criteria of R. Clausius, on the basis of which it was established that this type of entropy multiplied by the absolute temperature characterizes a certain level of potential energy of the system, which can be successfully converted to work in an isothermal reversible process, with the supply of an appropriate amount of heat, and in the adiabatic reversible process under consideration.

**Keywords:** entropy, thermodynamic potentials, Gibbs energy, Helmholtz energy, Carnot's theorem, Carnot cycle, ideal gas, isothermal process, adiabatic process, chemical energy, quasistatic process, reversible process.

**For citation:** Kiselev VG. On the ambiguity of the concept of ideal gas entropy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):32-42. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-32-42.

### Введение и литературный обзор

Одним из центральных понятий, применяемых при исследовании объектов как технической, так и химической термодинамики является понятие энтропии, которое, не смотря на свой весьма почтенный возраст активно используется и в настоящее время в целом ряде термодинамических соотношений, хотя применение его практически всегда связано с некоторыми проблемами, обусловленными сложностью восприятия и интерпретации данного термина. Вот как, например, об этом пишет И. Базаров [1]: «Однозначная функция состояния – энтропия, существование которой у равновесной системы устанавливает второе начало термодинамики, является величиной ненаглядной: её можно вычислить, но нельзя непосредственно измерить, подобно температуре или объёму – энтропиметров не существует».

Очевидно, что создание некоторых модельных представлений, которые могли бы адекватно и наглядно интерпретировать характеристики изучаемых термодинамических систем, для описания которых используется в том числе и понятие энтропии, позволило бы резко упростить изучение этой совсем не тривиальной дисциплины под названием термодинамика, что само по себе уже крайне важно в наше пересыщенное информацией время. Данная работа, базируясь на основных положениях, положенных в основу ряда предыдущих текстов [2-8], включая и публикации автора [9-10], продолжает тему исследования поведения идеального газа и его связи с понятием энтропия, что позволяет несколько иначе взглянуть на физическую сущность самого этого понятия. Следует отметить, что применение теории термодинамических потенциалов к системе «смесь идеальных газов» явилось ключевым фактором в появлении статьи под названием «Парадокс Гиббса и его решение», поэтому второй задачей представленной работы автор считает косвенное подтверждение основных принципов, положенных в основу этой, более ранней публикации. Одним из базовых понятий термодинамики, на основе которого в значительной степени построена, и дефиниция энтропии является – идеальный газ.

Приведём, пожалуй, самое распространённое его определение, имеющееся, например, в монографии М. Карапетьянца [11,12] «Идеальный газ характеризуется отсутствием межмолекулярных сил и исчезающе малым объёмом молекул по сравнению с объёмом, занимаемым газом. Состояние идеального газа является предельным гипотетическим состоянием всех тел при достаточно низких давлениях и высоких температурах.

Из определения следует, что идеальный газ обладает только кинетической энергией, которая не зависит от объёма».

Близкое по смыслу определение идеального газа мы находим в монографии Д. Эверета [12]: «Идеальным газом условимся называть газ, подчиняющийся уравнению состояния  $PV = nRT$ ».

Где,  $V$  – объём идеального газа;  $P$  – давление идеального газа;  $R$  – универсальная постоянная идеального газа;  $T$  – абсолютная температура;  $n$  – число молей идеального газа.

И. Базаров [1], как бы резюмируя и одновременно расширяя два предыдущих высказывания, пишет: «Для такой простой системы, как идеальный газ термическим уравнением состояния является уравнение Клапейрона–Менделеева:

$$PV = nRT, \quad (1)$$

где,  $n = m/\alpha$  – число молей газа;  $m$  – масса газа,  $\alpha$  – молярная масса газа.

Из закона Джоуля о независимости внутренней энергии газа от его объёма при постоянной температуре

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = 0 \quad (2)$$

следует калорическое уравнение состояния идеального газа:

$$U = \int C_V dT. \quad (3)$$

Для одноатомного идеального газа, как показывает опыт, теплоёмкость при постоянном объёме не зависит от температуры, поэтому:

$$U = C_V T + U_0. \quad (4)$$

где  $U$  – внутренняя энергия идеального газа;  $U_0$  – стандартное значение внутренней энергии идеального газа;  $C_V$  – теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме.

Несколько иной, но схожий подход к определению внутренней энергии идеального газа представлен в монографии И. Пригожина [13] в частности он пишет: «Если  $C_V$  не зависит от температуры и объёма, как в случае идеального газа, то

$$U = C_V T + U_0, \quad (5)$$

где  $U_0$  – произвольная постоянная. Как упоминалось ранее энергия  $U$  может быть определена только с точностью до некоторой постоянной. Для идеальных одноатомных

газов  $C_V = \frac{3}{2} R$ , а для двухатомных газов  $C_V = \frac{5}{2} R$ ».

Очевидно, что в последних двух случаях модель «идеальный газ» будет показывать большее совпадение своих свойств, со свойствами реальных газов при сравнении характеристик рассматриваемых объектов.

Таким образом, можно резюмировать, что все приведённые высказывания относительно модели «идеальный газ» базируются в основном на следующих экспериментальных фактах или выводах, сделанных на их основе:

1. Выполнение уравнения состояния идеального газа для рассматриваемой системы, которое для одного моля идеального газа сводится к следующему соотношению:  $PV = RT$

2. Идеальные газы, в силу того, что  $C_V$  постоянно для одного и того же идеального газа, но в общем различно для разных их видов, энергетически отличаются друг от друга, т. е. могут выполняться, например, следующие соотношения  $C_V = \frac{3}{2} R$  для одноатомных

газов, а для двухатомных газов  $C_V = \frac{5}{2} R$  и т. д.

3. Независимость внутренней энергии идеального газа от объёма, т. е. выполнение следующего равенства:  $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = 0$ .

4. Идеальный газ обладает только кинетической энергией, величина которой определяется следующим выражением  $U = C_V T + U_0$ .

Если первые три утверждения не вызывают никаких возражений, то четвёртое требует дополнительного обсуждения, так как явно противоречит ряду основных положений химической термодинамики. Здесь, прежде всего, следует выделить тезис о том, что идеальный газ обладает только кинетической энергией. Действительно, в химической термодинамике признание факта наличия химической энергии у идеального газа является достаточно общим признаком. Так, например, соответствующие утверждения можно встретить у М. Карапетянца и целого ряда других исследователей. В связи с этим обстоятельством рассмотрим влияние наличия химической (потенциальной) энергии у идеального газа, на основное уравнение термодинамики.

**Материалы и методы. Химическая (потенциальная) энергия идеального газа и основное уравнение термодинамики**

Признание факта наличия химической (потенциальной) энергии у идеального газа имеет ряд преимуществ, которые проявляются при анализе изотермических процессов с его участием, что мы и надеемся незамедлительно продемонстрировать. Действительно, опираясь на основные положения физической химии в этом случае можно говорить о протекании эндотермической химической реакции в квазистатических условиях, в рамках которой происходит изменение энергии Гиббса (Гельмгольца) рассматриваемой системы в точности равное объёмно-механической работе, совершаемой ею, а также количеству тепла, поглощаемому системой в результате протекания данного процесса, что соответствует, например, поведению идеального газа в верхней изотерме квазистатического цикла Карно, а сама реакция, записанная для определённости с участием некоторого конкретного идеального газа (водорода) выглядит следующим образом:

$$(H_2, V_1) \rightarrow (H_2, V_2). \quad (6)$$

Изменение энергии Гельмгольца этой реакции, как известно определяется следующей величиной:

$$\Delta F = -RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (7)$$

где,  $V_1$  и  $V_2$  – соответственно начальный и конечный объём идеального газа при протекании изотермического процесса его расширения.

Кроме того, известно, что для обратимого изотермического процесса расширения идеального газа [13] сторонняя (объёмно-механическая) работа определяется следующим соотношением

$$\Delta A_m = RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (8)$$

В свою очередь, количества тепла, поступившего в систему в этом случае в точности равно количеству сторонней объёмно механической работы [13], таким образом можно записать следующее соотношение

$$\Delta Q = \Delta A_m. \quad (9)$$

В силу равенства теплоты и работы при изотермическом обратимом процессе расширения (сжатия) идеального газа, используя предыдущие три уравнения можно записать

$$\Delta Q = -\Delta F = RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \Delta A_m. \quad (10)$$

Выберем в рассматриваемой нами системе в качестве стандартного состояния объём идеального газа равный единице ( $V_1 = 1$ ), тогда получаем следующее соотношение:

$$Q = -F = RT \ln V = A_m. \quad (11)$$

Из последнего уравнения, путём деления всех его частей на абсолютную температуру, получаем выражение для энтропии  $S_T$  одного моля идеального газа, участвующего в изотермическом процессе расширения или сжатия рассматриваемой системы со стандартным состоянием равным нулю, соответствующим объёму системы равному единице:

$$S_T = \frac{Q}{T} = -\frac{F}{T} = R \ln V = \frac{A_m}{T}. \quad (12)$$

Отметим, что величина  $S_T$  представленная в предыдущей формуле отвечает исключительно за обратимый процесс расширения (сжатия) идеального газа, тогда как энтропия  $S$ , ведённая в обращение Р. Клаузиусом справедлива для любого обратимого процесса (изотермического и адиабатического). Напомним, что она выражается следующей формулой [13]:

$$dS = \frac{dQ}{T}. \quad (13)$$

Однако, если сконцентрироваться не на величинах, связанных с теплотой ( $\frac{Q}{T}$ ) или работой ( $\frac{A_m}{T}$ ), то оказывается что изотермическая энтропия идеального газа  $S_T$ , будучи коэффициентом при свободной энергии Гельмгольца, которая, в свою очередь, являясь функцией состояния системы – «один моль идеального газа» однозначно характеризует его поведение при данной температуре, т. е. представляется для изотермических процессов величиной более универсальной, чем величина  $S$  связанная исключительно с обратимыми процессами. Закрепим приведённые рассуждения следующей формулой:

$$S_T = -\frac{F}{T} = R \ln V . \quad (14)$$

Иными словами,  $S_T$  однозначно определяет состояние именно одного моля идеального газа и совершенно не зависит от работы теплового двигателя в котором он может находиться, что не скажешь о величине  $S$ , т. е. энтропии Р. Клаузиуса, относящейся исключительно к обратимым процессам цикла Карно. В соответствии со сделанными замечаниями, вернёмся ещё раз к соотношению (13) и покажем, что предложенный нами метод исследования поведения идеального газа пригоден и для анализа необратимых изотермических процессов, например, для расширения идеального газа в пустоту. В этом случае, как показывает эксперимент, сторонняя работа отсутствует, следовательно, величина  $PV$  подлежит сокращению, и мы получаем:

$$U = TS_T + \sum \mu_i n_i . \quad (15)$$

Вместо  $\sum \mu_i n_i$ , введем величину  $\mu = \mu_0 - RT \ln V$  эквивалентную ей для одного моля идеального газа, тогда получаем:

$$U = TS_T + \mu_0 - RT \ln V . \quad (16)$$

Продифференцируем полученное соотношение, тогда, учитывая, что в изотермических процессах величина внутренней энергии постоянна, т. е.  $dU = 0$ , имеем:

$$S_T dT + T dS_T - P dV = 0 . \quad (17)$$

В силу того, что процесс изотермический получаем следующее соотношение:

$$T dS_T - P dV = 0 \quad (18)$$

Как известно энтропия идеального газа определяется следующим уравнением [13]:

$$S_T = S_T^0 + R \ln V . \quad (19)$$

Компильция двух последних соотношений позволяет утверждать, что уменьшение химической (потенциальной) энергии идеального газа при расширении его в пустоту полностью компенсируется совершением объёмно-механической работы и связанным с ней выделением тепла в рассматриваемой системе иными словами в этом процессе химическая (потенциальная) энергия полностью трансформируется в кинетическую энергию молекул при постоянстве их общей (внутренней) энергии. Отметим, что в соответствии с принятыми нами ранее условиями величина  $S$  (по Р. Клаузиусу), характеризующая обратимый изотермический процесс может быть заменена на  $S_T$ , которая характеризует, как обратимый изотермический процесс расширения идеального газа, так и необратимый – расширение идеального газа в пустоту. Как известно, данное обстоятельство полностью игнорируется технической термодинамикой, что при признаваемом ею факте роста энтропии в данном процессе, делает совершенно непонятным уменьшение энергии Гельмгольца (энергетической характеристики вещества), наблюдаемое в этом случае. Однако понимание некоторой ненормальности данной ситуации, при обсуждении процесса расширения идеального газа в пустоту, всё-таки присутствует, так, например, М. Карапетьянц в своей монографии [13], обсуждая этот вопрос, пишет: «Конечно, нельзя считать, что работа равна нулю на том основании, что расширяющийся газ не преодолевает какого-либо противодействия, так как пустота будет лишь в первый момент после открытия вентиля на трубке, соединяющий оба сосуда». К сожалению, данный тезис не получил дальнейшего развития и вопрос до настоящего времени оставался открытым.

Следовательно, и в этом случае величину  $RT \ln V$ , соответствующую потенциальной энергии накопленной системой, которая может быть отдана в изотермических процессах, можно рассматривать как величину возможного выделения тепловой энергии в рассматриваемой системе за счёт уменьшения её потенциальной энергии. Отметим, что представления об энтропии идеального газа, развитые в рамках данной работы с одной

стороны имеют вполне отчётливый физический смысл, с другой стороны несколько отличаются от общепринятых, что делает необходимым их верификацию. Данную задачу, с обсуждением полученных результатов, мы постараемся решить в следующем разделе данной работы.

#### Адиабатические процессы с участием идеального газа

Традиционный метод анализа обратимого адиабатического процесса с участием идеального газа [13] даёт следующее выражение для величины сторонней работы  $A_m$ , произведённой его одним молем в этом случае:

$$A_m = \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1}, \quad (20)$$

где

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (21)$$

В свою очередь, молярная теплоёмкость при постоянном объёме  $C_v$  и молярная теплоёмкость при постоянном давлении  $C_p$  связаны между собой следующим соотношением [13]:

$$C_p - C_v = R. \quad (22)$$

Компиляция последних трёх уравнений, позволяет записать равенство, определяющее стороннюю объёмно-механическую работу адиабатического процесса с участием одного моля идеального газа в следующем виде:

$$A_m = C_v(T_1 - T_2). \quad (23)$$

Покажем, что, используя метод термодинамических потенциалов, мы получим результат аналогичный предыдущему. Для этой цели, как и ранее воспользуемся химической реакцией с участием водорода (6). Однако, процесс будем проводить в два этапа. Сначала охладим исходный водород, находящийся в объёме  $V_1$  от температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$  при этом, высвободившееся тепло соберём в некотором аккумуляторе теплоты при температуре  $T_2$ . В дальнейшем, как и ранее проведём изотермический квазистатический процесс расширения идеального газа. Следует отметить, что возможность протекания этого процесса ограничена количеством тепла, накопленного в нашем аккумуляторе. Таким образом, используя энергию Гельмгольца для описания данного процесса также, как и ранее получаем:

$$\Delta Q = -F = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = \Delta A_m. \quad (24)$$

Компиляция последних двух соотношений делает возможной запись следующего равенства:

$$\Delta Q = -\Delta F = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = \Delta A_m = C_v(T_1 - T_2) \quad (25)$$

В свою очередь, деление всех частей предыдущего уравнения на  $T_1$  позволяет записать выражение для  $\Delta S_A$ , которое можно трактовать как изменение адиабатической энтропии идеального газа:

$$\Delta S_A = \frac{\Delta Q}{T_1} = -\frac{\Delta F}{T_1} = -R \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{\Delta A_m}{T_1} = C_v \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \quad (26)$$

Данное соотношение можно сделать ещё более наглядным, если выбрать в качестве стандартного состояния, характеризующего адиабатические процессы с участием идеального газа – его состояние при температуре абсолютного нуля. Энтропию в этом случае также можно считать равной нулю, так как при стремлении к абсолютному нулю температур  $T_1$  и  $T_2$ , теплоёмкость  $C_v$  также стремится к нулю, и, следовательно,  $S_A(T \rightarrow 0)$  также стремится к некоторой постоянной величине, которую можно принять за нулевую точку отсчёта. Резюмируя сказанное, можно утверждать, что «адиабатическая» энтропия идеального газа  $S_A$ , при принятии за стандартное состояние её значение при температуре абсолютного нуля также равно нулю является постоянной величиной, которая не зависит ни от температуры, ни от объёма идеального газа, а её значение определяется следующим соотношением:

$$S_A = C_V . \quad (27)$$

Следовательно, энтропия идеального газа, как некоторая энергетическая и одновременно суммарная характеристика возможности протекания обратимых процессов (изотермического и адиабатического), нормированная на величину абсолютной температуры  $S_\Sigma = S_A + S_F$  выражается следующим образом:

$$S_\Sigma = S_F^0 + R \ln V + S_A^0 + C_V . \quad (28)$$

При этом при принятии нами за стандартное состояние для адиабатического процесса состояние идеального газа при температуре абсолютного нуля, а для обратимого изотермического процесса энтропию соответствующую объёму одного моля идеального  $V = 1$ , т. е. считая, что:

$$S_T^0 = R \ln(V = 1) = 0 . \quad (29)$$

Окончательно получаем:

$$S_\Sigma = R \ln V + C_V \quad (30)$$

Очевидно, что энергетически данная энтропия, умноженная на величину абсолютной температуры системы, соответствует количеству тепла, используемого системой, которое определяется следующей формулой:

$$Q = RT \ln V + TC_V . \quad (31)$$

Именно оно будет трансформировано в стороннюю объёмно-механическую работу при последовательном протекании изотермического и адиабатического обратимых процессов (указанная очерёдность важна), при этом конечно должно соблюдаться условие о постоянстве количества тепла, поступающего в систему во время протекания изотермических процессов. Кроме того, необходимо отметить, что и при отсутствии поступления тепла «извне» возможно изотермическое расширение газа в пустоту, которое происходит без совершения им сторонней работы, однако, как мы отмечали ранее в этом случае, при постоянстве внутренней энергии системы её потенциальная энергия трансформируется в кинетическую энергию молекул.

Для оценки влияния факта наличия химической (потенциальной) энергии у идеального газа на основное уравнение термодинамики воспользуемся монографией Л. Антропова, где в частности указывается, что внутренняя энергия системы определяется следующим соотношением:

$$U = TS - PV + \sum \mu_i n_i , \quad (32)$$

где,  $n_i$  – число молей  $i$ -го вещества, а  $\mu_i$  – химический потенциал  $i$ -го вещества.

В свою очередь, полный дифференциал внутренней энергии равен следующей величине:

$$dU = TdS + SdT - PdV - VdP + \sum \mu_i dn_i + \sum n_i d\mu_i \quad (33)$$

Перепишем последнее уравнение для одного моля идеального газа, принимающего участие в изотермическом процессе, тогда получаем:

$$dU = TdS - PdV - VdP + d\mu . \quad (34)$$

Известно, что химический потенциал одного моля идеального газа имеет следующий вид [13, с. 31]:

$$\mu = \mu_0 + RT \ln P . \quad (35)$$

Тогда его дифференциал при постоянной температуре будет выглядеть следующим образом:

$$d\mu = \frac{RT}{P} dP . \quad (36)$$

Подстановка последнего соотношения в уравнение (8) и преобразование его с учётом термического уравнения состояния, записанного для одного моля идеального газа, а также и сокращение подобных членов позволяет получить характеристическую функцию для внутренней энергии, т. е. следующее равенство:

$$dU = TdS - PdV - VdP + VdP . \quad (37)$$

Последнее соотношение после сокращения можно привести к следующему виду:

$$dU = TdS - PdV \quad (38)$$

Следовательно, можно утверждать, что введение химической энергии, в объединённое уравнение термодинамики, описывающее состояние одного моля идеального

газа математически ни коем образом не влияет на вид этого уравнения, а значит и других термодинамических функций, получаемых на его основе, в частности, функций, определяющих термодинамические потенциалы рассматриваемой системы. В силу того, что при выводе последнего уравнения особо подчёркивалось, что процесс изотермический, то, очевидно, что и последний вывод гарантированно относится исключительно к изотермическим процессам, в рамках которых можно, как мы только что выяснили, утверждать, что идеальный газ имеет и химическую (потенциальную) энергию.

#### Результаты и их обсуждение

Для верификации соотношения определяющего энтропию идеального газа (37) полученного в предыдущем разделе необходимо в частности, показать, что оно соответствует классическому определению данного понятия, сделанного Р. Клаузиусом. С этой целью рассмотрим ход его рассуждений в этом случае, суть которого излагается практически в любой книге по термодинамике, что позволяет нам привести только резюмирующую часть этого вывода, имеющегося, например, монографии И. Пригожина [13]. При этом следует особо подчеркнуть следующие обстоятельства:

1. Р. Клаузиус в своих рассуждениях фактически использует классическую модель «идеальный газ», которая имеет в явной или не явной форме четыре признака, уже рассмотренные нами в данной работе.

2. Сторонняя объёмно-механическая работа, совершаемая системой на верхней изотерме цикла Карно в точности равна количеству тепла, поступившего в систему при использовании одинаковых единиц измерения.

3. Сторонняя объёмно механическая работа, совершаемая над системой на нижней изотерме цикла Карно в точности равна количеству тепла, отданного системой в окружающую среду при использовании одинаковых единиц измерения.

4. Отношение количества тепла, поступившего в систему к её температуре в изотермических процессах цикла Карно, протекающих при разных температурах, равно друг другу по абсолютной величине и противоположно по знаку, аналогичная ситуация с точностью до знака наблюдается и в отношении сторонней работы, что позволяет сделать вывод о равенстве по абсолютной величине теплоты и работы в отдельно взятых изотермах.

5. На адиабатах цикла Карно, используемых Р. Клаузиусом, совершается равная по абсолютной величине, но противоположная по знаку сторонняя работа, так что в циклическом процессе эти работы пойдут на сокращению.

6. Количество тепла, поглощаемого системой «идеальный газ» из стороннего источника или отданного ею на каждой из адиабат равно нулю.

7. Анализ адиабат цикла Карно [13], позволяет утверждать, что в результате совершения сторонней работы на адиабатах системой или над системой наблюдается уменьшение соответственно увеличение её внутренней энергии, которое определяется следующей формулой  $U = C_V(T_2 - T_1)$ .

8. Обмен теплом системы с окружающей средой в адиабатическом процессе, как, впрочем, это напрямую следует из определения адиабат – отсутствует, следовательно, по Р. Клаузиусу и изменение энтропии системы в этом случае так же не наблюдается, т. е.  $\Delta S = 0$ .

При этом следует особо подчеркнуть, что все утверждения, приведённые выше относятся именно к циклу Карно или к его «обобщению», иными словами исследуется работа соответствующей циклической обратимой тепловой машины. Для упрощения ситуации, без ограничения общности, признаем вслед за Р. Клаузиусом, справедливость осуществлённого им перехода простой цикл Карно – обобщённый цикл Карно, и в дальнейшем будем рассматривать именно простой цикл Карно. Далее Р. Клаузиус [13] резюмирует свои изыскания тем, что определяет «функцию  $S$ , которая зависит только от начального и конечного состояний обратимого процесса» следующим образом:

$$dS = \frac{dQ}{T}, \quad (39)$$

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad (40)$$

Иными словами, энтропия  $S$  является функцией состояния рассматриваемой системы. Однако, несмотря на это математически безупречное введение в обращение данной функции, физический смысл её остаётся не вполне понятным даже для идеального газа, не говоря уже о значительно более сложных объектах исследования.

Попытаемся понять причины данного явления. Оно тем более представляется странным, что при анализе используется комбинация простых и хорошо изученных

объектов (идеальный газ, тепловой двигатель Карно, работающий в том числе и по обобщённому циклу Карно) и процессов (обратимые и квазистатические процессы, изотермические процессы, адиабатические процессы). При этом отметим, что в отношении обратимых изотермических процессов, энтропия, введённая в данной работе и энтропия Р. Клаузиуса полностью совпадают, точнее сказать  $S$  является частным случаем  $S_T$ , которая справедлива как для обратимых так и для необратимых процессов. Расхождение наблюдается только при анализе обратимых адиабатических процессов, в рамках которых Р. Клаузиусом накладывалось условие о взаимоуничтожении энтропии в адиабатах цикла Карно. Математически это означает, что может быть множество функций (энтропий) являющихся функцией состояния рассматриваемой системы. Иными словами, величина

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

хоть и однозначно определяет состояние системы, но таких величин, однозначно определяющих состояние системы может быть, как минимум несколько, главное, чтобы в адиабатических процессах цикла Карно они были равны друг другу по абсолютной величине и противоположны по знаку. В этом, вероятно, и кроется основная проблема сложности адекватного толкования физического смысла понятия энтропии. В силу этого, реально в термодинамике существуют несколько видов «адиабатической»  $S_A$  энтропии, удовлетворяют поставленному выше условию. Следствием данного факта является наличие разных значений «суммарной»  $S_{\Sigma} = S_A + S_T$  энтропии.

Отметим, что суммарная энтропия, предложенная в данной работе, вполне удовлетворяет названному условию, а её физический мы уже рассмотрели ранее.

Близкий по смыслу вид энтропии представлен в монографии И. Базарова [1]. В этом случае её значение на разных адиабатах хоть и постоянно, но эти постоянные, в частности, исходя из представленного в монографии рисунка, различны [1]. Выход из этой ситуации найден достаточно простой. Считается, что на обеих адиабатах  $\frac{dQ}{T} = 0$ , что в совокупности

с взаимоуничтожением «изотермических» энтропий приводит к нулевому изменению энтропии при прохождении всего цикла Карно. Определить физический смысл данного вида энтропии затруднительно, т. к. она обычно связывается с отсутствием поступления тепла извне, хотя сама система (идеальный газ), при этом охлаждается, или нагревается.

И. Пригожин [13] «адиабатическую энтропию» идеального газа, которая в пересчёте на один его моль и принятии стандартного значения энтропии равным нулю, определяет следующим образом:

$$S_A = C_V \ln T. \quad (41)$$

Естественно, что  $S_A$ , во-первых, отличается от всех видов предыдущих аналогичных энтропий, а во-вторых в совокупности с «изотермической» энтропией удовлетворяет условиям Р. Клаузиуса, т. е. суммарная энтропия и в этом случае является функцией состояния системы. В тоже время физический смысл её интерпретировать весьма затруднительно. Вероятно, это обусловлено тем, что вывод «суммарной» энтропии идеального газа в этом случае по существу основывается на уравнении, описывающем изотермический процесс [13] и перенос его на процесс адиабатический представляется недостаточно корректным.

Д. Эверет [12] и многие другие авторы определяют энтропию следующим образом:

$$\frac{dF}{dT} = -S. \quad (42)$$

Этот вид определения энтропии имеет вполне отчётливый физический смысл (для идеального газа  $S = S_0 + R \ln V$ ), т. к. умножение её на абсолютную температуру с учётом соответствующего знака, даёт выражение для свободной энергии Гельмгольца  $F = F_0 - RT \ln V$ , т. е. способности системы совершить определённую изотермическую работу. Следует отметить, что она удовлетворяет и условию Р. Клаузиуса, однако, с её помощью невозможно определить работу в адиабатах, так как величина  $R(T_2 - T_1) \ln V$  не равна величине  $C_V(T_2 - T_1)$ , используемой для определения работы в адиабатах цикла Карно.

И наконец, у Л. Николаева [13] указано, что «для определения величины изменения энтропии в процессе обратимого перехода системы из некоторого начального состояния 1 в конечное 2 необходимо вычислить интеграл:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}. \quad (43)$$

В силу того, что энтропия – функция состояния системы, в нашем случае идеального газа, то любое перемещение на координатной плоскости  $P, V$  можно разбить на два процесса – изотермический и адиабатический. Если при перемещении по изотерме, в силу постоянства абсолютной температуры справедливость предыдущего уравнения не вызывает никаких сомнений, то при протекании адиабатического процесса, при наличии изменений как величины  $Q$ , так и абсолютной температуры корректнее использовать следующий интеграл:

$$\Delta S = \int_1^2 d\left(\frac{Q}{T}\right). \quad (44)$$

Известно, что в случае идеального газа  $Q = C_V T$ , следовательно, подстановка этого соотношения в предыдущий интеграл позволяет записать следующее выражение:

$$\Delta S = C_V (T_2) - C_V (T_1) = 0. \quad (45)$$

Иными словами энтропия идеального газа при адиабатических процессах остаётся постоянной и равной  $C_V$ , т. е. в этом случае справедливо следующее соотношение:

$$S = S_A = C_V (T) = \text{Const}. \quad (46)$$

Аналогичная ситуация наблюдается и при охлаждении или нагревании идеального газа без совершения сторонней работы им или над ним. Физический смысл данного типа энтропии  $S_\Sigma = S_A + S_T$  уже рассмотрен нами ранее.

### Выводы

В предложенном тексте проведён критический разбор порядка введения понятия энтропии Р. Клаузиусом, в рамках которого установлено, что «изотермическая энтропия»,

определяемая для идеального газа величиной  $S_T = \frac{Q_T}{T} = R \ln V$  однозначно определяет

состояние системы, состоящей из одного моля идеального газа в момент нахождения её в обратимом изотермическом процессе, в то время, как в отношении «адиабатической» энтропии Р. Клаузиусом наложено условие – о взаимоуничтожении адиабат в термодинамическом цикле Карно, что приводит к многозначности данного вида энтропии

$S_A = \frac{Q_A}{T}$ , а следовательно, и многозначности общей «суммарной» энтропии идеального

газа  $S_\Sigma = S_A + S_T$ , при этом любой из конкретных видов этой «суммарной» энтропии является функцией состояния рассматриваемой системы. В термодинамике используют, как минимум, следующие виды «адиабатической» энтропии характеризующие один моль идеального газа  $S_A = \text{Const}; R \ln V; C_V \ln T$ , а в рамках данной работы и  $C_V$ .

Установлено, что суммарная энтропия одного моля идеального газа  $S_\Sigma = R \ln V + C_V$ , умноженная на абсолютную температуру характеризует некий уровень потенциальной (химической) энергии системы, которая может быть последовательно преобразована в работу в изотермическом процессе, при подводе соответствующего количества тепла, и в последующем адиабатическом процессе.

### Литература

1. Базаров И. П. Термодинамик. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1976. 447 с.
2. Gibbs J. Willard. The Collected Works. London, Toronto: Longmans, Green and Co., 1928. V.1. XXVIII – 434 p.
3. Хайтун С. История парадокса Гиббса: монография. Москва: Издательство «Комкнига», 2016. 168 с.
4. Kiselev V.G., Sergeev V.V., Rouzich E.N. Influence of the electric double-layer capacitance at the rate of corrosion at the phase interface // Corr. Rev. 2017, V. 35. Iss. 1. pp. 47–51.
5. Ihnatovych V. On the incorrectness of the proof of the Gibbs theorem on the entropy of a mixture of ideal gases, which was given by J. W. Gibbs. Preprint at <http://arxiv.org/pdf/1804.08721> (2018).
6. Ihnatovych V. Explanation of the Gibbs paradox. Available at: URL: <https://zenodo.org/record/2908285>.
7. Cite as: Ihnatovych Volodymyr. (2019, May 18). Explanation of the Gibbs paradox. Zenodo. Available at: <http://doi.org/10.5281/zenodo.2908285>.
8. Ulrich Bette. Ergebnisse des Feldversuchens an einer durch Bahnwech selstrombe einflusssten Rohrleitung // 3R International, 2016. № 6. pp. 40-45.

9. Киселёв В. Г. Парадокс Гиббса и его решение // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 11-12. С. 129-137.
10. Киселёв В. Г. Тепловые машины Филиппа и Карно с точки зрения теории термодинамических потенциалов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики 2018. № 9-10. С. 154-165.
11. Карапетьянц М. Х. Химическая термодинамика: монография. Москва – Ленинград: «Государственное научно-техническое издательство химической литературы», 1953. 611 с.
12. Эверет Д. Введение в химическую термодинамику: монография. Москва: «Издательство иностранной литературы». 1963. 279 с.
13. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: монография. Москва: Мир. 2002. 461 с.
14. Шапаронов М. И. Введение в молекулярную теорию растворов. М.: Гос. Издательство технико-теоретической литературы, 1956. 507 с.
15. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия: монография. Москва: Издательство «Высшая школа», 1975. 568 с.

### Авторы публикации

**Киселев Владимир Геннадьевич** — д-р.техн.наук, профессор кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: kis\_vg@mail.ru.

### References

1. Bazarov IP. *Thermodynamic*. 2-e izd., pererab. I dop. – M.: Vysshaya shkola, 1976. 447 p.
2. Gibbs J, Willard. *The Collected Works.*, London, Toronto: Longmans, Green and Co., 1928; 1: XXVIII–434 p.
3. Hajtun S. *The Gibbs Paradox Story: A Monograph*. Moskva: Izdatel'stvo «Komkniga», 2016. 168 p.
4. Kiselev VG, Sergeev VV, Rouzich EN. *Influence of the electric double-layer capacitance at the rate of corrosion at the phase interface*. *Corr. Rev.* 2017; 35(1): 47–51.
5. Ihnatovych V. *On the incorrectness of the proof of the Gibbs theorem on the entropy of a mixture of ideal gases, which was given by J. W. Gibbs*. Preprint at <http://arxiv.org/pdf/1804.08721> (2018).
6. Ihnatovych V. *Explanation of the Gibbs paradox*. URL: <https://zenodo.org/record/2908285>.
7. Ihnatovych Volodymyr. (2019, May 18). *Explanation of the Gibbs paradox*. Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.2908285>.
8. Ulrich Bette. *Ergebnisse des Feldversuchens an einer durch Bahnwech selstrombe einflussten Rohrleitung*. *3R International*. 2016; 6: 40-45.
9. Kiselev VG. Gibbs paradox and its solution. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2016; 11-12: 129-137.
10. Kiselev VG. Carnot and Philips heat engines in view of the theory of the thermodynamic potentials *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2018; 9-10: 154-165.
11. Karapetyants M. H. Chemical thermodynamics: monograph. Moskva – Ленинград: «Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo himicheskoy literatury», 1953. 611 p.
12. Everett D. *Introduction to chemical thermodynamics*: monograph. Moskva. Foreign Literature Publishing House. 1963. 279 p.
13. Prigozhin I, Kondepudi D.. From the heat engines to the dissipative structures: monograph. M.: Mir, 2002. 461 p. *Contemporary thermodynamics*
14. Nahparonov SM. *Introduction to the molecular theory of solutions* M.: Gos. izd. tekhniko-teoreticheskoy literatury. 1956. 507 p.
15. Antropov LI. *Theoretical electrical engineering*: monograph. Moskva. Izd-vo «Vysshaya shkola», 1975. 568 p.

### Authors of the publication

**Vladimir G. Kiselev** – Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. E-mail: kis\_vg@mail.ru.



## ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

С.Х. Масаев<sup>1</sup>, У.Х. Макаев<sup>2</sup>, М.В. Дебиев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ПАО «Россети Северный Кавказ» г. Грозный, Россия

<sup>2</sup>Ремонтно-строительная фирма ООО «Мир» г. Грозный, Россия

<sup>3</sup>ГГНТУ имени академика М.Д. Миллионщикова,

г. Грозный, Россия,

mair76@mail.ru

**Резюме:** В статье рассмотрено состояние функционирования электроэнергетики Чеченской Республики. Приведены сравнительные данные по приему в сеть и полезному отпуску электроэнергии Чеченской Республики за последние годы. Рассмотрена структура суммарной трансформаторной мощности всех подстанций, а также общая протяженность линий электропередачи АО «Чеченэнерго». Изучены основные проблемы электроэнергетики Чеченской энергосистемы, которыми являются отсутствие собственных генерирующих мощностей, нехватка трансформаторных мощностей подстанций 110 и 35 кВ и высокий уровень износа основных производственных фондов электросетевого хозяйства. Рассмотрены задачи по снижению потерь электрической энергии Чеченской энергосистемы. Определены значения и причины потерь электрической энергии в разных районных электрических сетях (РЭС) АО «Чеченэнерго». Выполнен сравнительный анализ по потерям электрической энергии за последние годы. Рассмотрены вопросы, касающиеся реактивной мощности в электрических сетях. Проведен анализ по определению значений реактивной мощности в разных районных электрических сетях АО «Чеченэнерго». Предложены мероприятия, способствующие нормализации реактивной мощности и улучшению технико-экономических показателей в электрических сетях. Проведен анализ улучшения электрических схем сетей для обеспечения устойчивости и надежности электроснабжения потребителей республики. Предложена система управления и диагностирования производственным процессом, которая позволит регулировать и координировать деятельность по управлению техническим состоянием, а также надежностью энергосистемы.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, энергосистема, центр питания, электрическая энергия, потери электрической энергии, класс напряжения, районные электрические сети (РЭС), реактивная мощность, линия электропередачи.

**Для цитирования:** Масаев С.Х., Макаев У.Х., Дебиев М.В. Основные этапы повышения функционирования электросетевого комплекса Чеченской Республики // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4. С. 43-53. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-43-53.

## BASIC STAGES OF INCREASING FUNCTIONING ELECTRIC POWER OF THE CHECHEN REPUBLIC

SKh. Mashaev<sup>1</sup>, UKh. Mashaev<sup>2</sup>, MV. Debiev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PJSC Rosseti North Caucasus Grozny, Russia

<sup>2</sup>Repair and construction company LLC «Mir», Grozny, Russia

<sup>3</sup>GGNTU named after academician M.D. Millionshchikova,

Grozny, Russia

mair76@mail.ru

**Abstract:** The article considers the state of the electric power industry functioning of the Chechen Republic. Comparative data on the reception in the network and useful electricity supply of the Chechen Republic in recent years are presented. The total transformer capacity structure of all substations, as well as the power lines total length of Chechenenergo JSC, is considered. The main electric power industry problems of the Chechen power system, which are the lack of own generating capacities, the transformer capacities shortage of substations 110 and 35 kV and the main production assets high level wear of the electric grid economy, are studied. The tasks to reduce the Chechen energy system electric energy losses are considered. The values and causes of the electric energy losses in different district electric networks (RES) of JSC "Chechenenergo" are determined. A comparative analysis of the electrical energy losses in recent years has been performed. Issues related to reactive power in electrical networks are considered. An analysis was carried out to determine the reactive power values in different district electric networks of Chechenenergo JSC. Measures are proposed that contribute to the reactive power normalization and the improvement of technical and economic indicators in electric networks. The networks electrical circuits improvement analysis was carried out to ensure the power supply stability and reliability to consumers in the republic. The production process control system and diagnostics is proposed, which will allow to regulate and coordinate the activities to manage the technical condition, as well as the power system reliability.

**Keywords:** electric power industry, power system, power center, electric energy, electric energy losses, voltage class, district electric networks, reactive power, power line.

**For citation:** Masaev SKh, Macaev UKh, Debiev MV. Basic stages of increasing functioning electric power of the Chechen Republic. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(4):43-53. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-43-53.

## Введение

Стабильное функционирование электроэнергетики, как одной из самой высокотехнологичной отрасли промышленности, является гарантом развития всех отраслей народного хозяйства и обеспечения комфорта населению. Электроэнергия дает человеку свет и тепло, облегчает его физический и интеллектуальный труд. Одним словом – без электроэнергии невозможно представить себе современную жизнь.

Благодаря развитию добычи и переработки нефти, одной из первых на Северном Кавказе электростанций была построена в г. Грозном в 1895 г. при нефтеперегонном заводе на Старых промыслах, а в 1896 г. вторая электростанция, также при нефтеперегонном заводе. Эти даты являются началом зарождения электроэнергетики Чеченской Республики [1].

Электроэнергетика переносит тяжелый процесс реформы, когда некий единый механизм разделен на несколько частей: генерацию, электросети, энергосбыт и управление. В электроэнергетике произошла реформа, которая вызвала новую форму «болезни» как для энергетики, так и населения. Это хороший метод управления человеческим коллективом, но трудно приживается к технологическому процессу функционирования энергосистемы. Разделены производственные службы на независимые подразделения: службу подстанций, службу релейной защиты и автоматики, службу изоляции и диагностики оборудования, метрологическую службу, диспетчеров по транспорту электроэнергии, энергосбыт.

## Материалы и методы

АО «Чеченэнерго» является субъектом оптового рынка электроэнергии, а также гарантирующим поставщиком электроэнергии, обслуживающим потребителей пяти городов (Грозный, Гудермес, Аргун, Шали, Урус-Мартан) и 16 сельских районов Чеченской Республики. АО «Чеченэнерго» обслуживает 200 тыс. физических и 16 тыс. юридических лиц.

Приём в сеть в 2018 году составил 2,75 млрд. кВт.ч. при полезном отпуске 1,76 млрд.кВт.ч. В 2019 году приём в сеть составил 2,90 млрд. кВт. ч. при полезном отпуске 1,83 млрд. кВт.ч.

На балансе АО «Чеченэнерго» имеется следующий технический потенциал – количество подстанций (ПС)4928 шт., в том числе [2]:

- 27 ПС 110 кВ;
- 59 ПС 35 кВ;
- 4842 ПС 6-10 кВ.

Суммарная трансформаторная мощность всех подстанций составляет – 2258,96 МВА.

Протяженность линий электропередачи составляет – 14678,31 км, в том числе:

- ВЛ 110 кВ – 52 шт. (1150,54 км);
- ВЛ 35 кВ – 88 шт. (980,65 км);
- ВЛ 6-20 – 355 шт. (4798,85 км);
- ВЛ 0,4 – 7408 шт. (7748,27 км);
- КЛ 6-20 кВ – 441 шт. (459,62 км);
- КЛ 0,4 кВ – 449 шт. (644,95 км).

АО «Чеченэнерго» проводит единую техническую политику, направленную на техническое развитие, повышение надежности и эффективности функционирования основных средств [3].

В рамках снижения потерь электроэнергии по всем районным электрическим сетям (РЭС) проводилось проектное обследование всех распределительных сетей, выполнялись расчеты потерь и допустимых дисбалансов электроэнергии.

Планируется создать такой экономический механизм, который бы ставил в прямую зависимость рост заработной платы персонала от его квалификации, активности и эффективности действий в области снижения электрических потерь.

Можно смело утверждать, что главной негативной характеристикой текущего состояния электроэнергетики являются показатели потерь электрической энергии, которые создают огромные убытки Чеченской энергосистеме. Это невыгодно никому, ни потребителям, так как для них вырастут тарифы, ни работникам АО «Чеченэнерго». В виду вышесказанного, одной из главных и первоочередных задач для Чеченской энергосистемы является снижение потерь электрической энергии [4,5,6].

#### **Результаты и обсуждения**

Одной из первоочередных задач повышения функционирования электроэнергетики является снижение потерь электрической энергии в сетях. Ситуацию с потерями электрической энергии невозможно описать, используя слово «замечательно». Если говорить более подробно, то есть две главные проблемы: это хищение электроэнергии и потери в сетях. Если говорить о последней (потери в распределительных электрических сетях 0,4 кВ), то здесь основные причины таковы: низкое сечение провода; некачественное соединение проводов; несимметричное распределение нагрузки по фазам [7,8,9].

В связи с развитием рыночных отношений для хозяйствующего объекта, проблемы потерь электроэнергии существенно возрастают и требуют поиска новых путей их снижения. Эти пути и подходы должны вырабатываться и реализовываться с учетом существенных изменений в сетях [10,11,12]. Рост потерь в электрических сетях определен действием физических закономерностей и развитием всей энергосистемы АО «Чеченэнерго» в целом. Поэтому потери в электрических сетях неизбежны. Однако, их снижение до экономически обоснованного уровня, является одним из главных направлений энергосбережения. Актуальность данной проблемы отражается не только в финансовой стабильности АО «Чеченэнерго», но и в увеличении убытков, а для потребителей, в конечном итоге, рост тарифов на электроэнергию.

Электрическая энергия является видом продукции, для передачи которой расходуется часть передаваемой электроэнергии, которая необходима для создания магнитных полей, необходимых на ее транспортировку. Поэтому потери электроэнергии при ее транспортировке неизбежны. Непрерывный рост нагрузок, обусловленный незаконным подключением некоторых потребителей, нередко вызывает увеличение загрузки электрических сетей выше экономически запланированного уровня, что ведет к дополнительному увеличению потерь электроэнергии. Во многих селах, где осуществлялись выдачи земельных участков под строительства частных домовладений, идет массовый застрой домов, где соответственно тянутся провода для подачи электричества в стихийном исполнении. Пока приходится констатировать, что плохие показатели превосходят наши желания и усилия. Анализ показал, что росту потерь электроэнергии в распределительных сетях АО «Чеченэнерго» способствует в основном следующие факторы:

– отставание темпов нового сетевого строительства от темпов роста нагрузки; (это заметно на единичных трансформаторных пунктах густо заселенной местности в Курчалоевском, Шалинском и Грозненском районах Чеченской Республики);

– несоответствие техническим параметрам элементов сети; (линии имеют большие недопустимые по нормативу длины, связи с расширением застроек) от центра установки трансформаторов, что вызывает излишние потери на нагреве проводов);

– высокой неравномерностью электрических нагрузок; (по диспетчерским данным снятых нагрузочных показаний по трансформаторным пунктам, свидетельствуют разные загрузки по фазам, что существенно влияет на рост потерь электроэнергии);

– несоответствие сечения проводов ВЛ нагрузкам; (по данным предпроектного обследования выявлено наличие проводов в сетях несоответствующих нагрузкам, например в Шелковском, Шатойском и Итум-Калиском районах, где во многих местах до сих пор используется провод сечения А-16 в фазных проводах);

– увеличение установленной мощности трансформаторов; (имеются места потребительского значения, где стоят трансформаторные пункты, загруженные лишь до 20%, что также приводит к дополнительным потерям в сетях).

Традиционные распределительные сети 0,4 -10 кВ, построенные еще в прошлом веке, в нынешних условиях имеют ряд существенных технологических недостатков:

- большая длина сетей;
- небольшая пропускная способность;
- значительное количество длинных ответвлений к потребителям;
- большие коммерческие потери электроэнергии из-за простоты подключения (нарушена технология подключения).

В Чеченской Республике такие недостатки имеются в плоскостных районах, где преобладают обширные равнинные территории, как Шелковской, Наурский и Надтеречный районы. Подобные же проблемы возникают с горными селами, расположенными по длинным горным ущельям, где почти отсутствует возможность строительства новых резервных ВЛ, из-за географического расположения. Поэтому частые сбои электричества являются причинами социального неудобства местных жителей, это относится к Шатойскому, Итум-Калинскому, Шароевскому, Ножай-Юртовскому и Веденскому районам.

Немаловажная проблема и на объектах, которые не были изначально на балансе «Чеченэнерго», а сейчас вошли в АО «Чеченэнерго». Они несут большие потери электроэнергии: электрические сети ветхие, давно не подвергались капитальным ремонтам. Активы из МЖКХ были переданы на баланс в АО «Чеченэнерго». В основном эти сети из городов Грозный, Гудермес, Аргун и станицы Шелковская. На этих полуразрушенных объектах не проводились даже промежуточные восстановительные процессы, после известных всем разрушительных событий в Чечне. Потому, объекты таких районов стали проблемными не только с точки зрения стабильности электроснабжения, но и с большими потерями электроэнергии, что отражается на экономических составляющих. В то время, как все вокруг не стоит на месте, а продвижений вперед нет, кажется, будто движение идет назад. Проведенное проектное обследование и выводы инженерных изысканий наталкивают на применение технологических новшеств, что позволит кардинально изменить прошлые стереотипы строительства и реконструкции ВЛ в наиболее проблемных районах.

Электроэнергия, расходуемая при ее транспортировке называется технической потерей. В силу существующих географических очертаний и сложившейся структуры электрических схем и их параметрических данных, в каждом РЭС индивидуально определяются нормативы потерь, составляются мероприятия, которые на практике почти не реализуются из-за финансовой ограниченности.

В течение периода с 2005 по 2019 гг. суммарные потери в АО «Чеченэнерго» снизились незначительно как в абсолютном значении, так и в процентах отпуска электроэнергии в сеть. Так, если взять отчетные данные по РЭС, за 2016 год по всем РЭС и в целом по АО «Чеченэнерго» в итоге потери составляли – 34,0%, за 2017 год – 34,4%, за 2018 год – 35,7%, за 2019 год составляют – 36,8%. Основными причинами из них являются: непрерывный рост нагрузок электрических сетей, связанный с естественным ростом нагрузок электрических сетей и отставания темпов прироста пропускной способности сети от темпов прироста потребления электроэнергии [13].

За последнее десятилетие потребление электроэнергии по Чеченской Республике увеличилось в два раза. После известных событий задача стояла «подать свет» потребителям любыми путями и способами, а далее были проблемы из-за ограниченности финансирования Чеченской энергетики. Вопрос электроснабжения потребителей, который решался эпизодично, а порой и стихийно несдержанными потребителями, не всегда соответствовал нынешним стандартам требования. В некоторых населенных пунктах оставались нерешенными вопросы организации контроля за потреблением электроэнергии и системы учета.

Нормирование уровня потерь определяется на основе ручного расчета потерь на определенный период без прогнозных расчетов. Проектировщики тотально обследовали все сети напряжением 0,4 – 10 кВ и выделили два необходимых значения такого норматива: прогнозируемые нагрузки и фактически состоявшиеся нагрузки в конце определенного периода. Прогнозируемое значение потерь включается в тариф [13,14].

При выполнении работ проектными организациями, приоритетными были направления в очередности внедрения мероприятий по снижению потерь электроэнергии. В ходе обследования электрических сетей проводился визуальный анализ:

- отчетных диспетчерских данных по РЭС, по балансам и потерям электроэнергии в сетях;
- систем коммерческого и технического учета электроэнергии;
- мероприятий по снижению потерь и повышению качества электроэнергии.

Проанализировав данные по электрическим сетям, напрашивается вывод: в электрических сетях нарушен баланс между активной и реактивной мощностями.

Потребители должны соблюдать значения соотношения (тангенса) потребления реактивной и активной мощности, определенной в договоре в соответствии с порядком, утвержденным Минпромэнерго РФ. Указанные характеристики определяются сетевой организацией для потребителей услуг, присоединенным к электрическим сетям напряжением 35 кВ и ниже.

При отклонении потребителя от установленных договором значений соотношения в результате участия в регулировании реактивной мощности по согласованию с сетевой организацией он оплачивает услуги по передаче электрической энергии, в том числе в составе конечного тарифа (цены) на электрическую энергию, поставляемую ему по договору энергоснабжения с учетом понижающего коэффициента, устанавливаемого в соответствии с методическими указаниями, утверждаемыми ФСТ РФ (Федеральная служба по тарифу Российской Федерации).

В случае несоблюдения потребителем услуг установленных договором значений соотношения потребления активной и реактивной мощности, кроме случаев, когда это явилось следствием выполнения диспетчерских команд или распоряжений субъекта оперативно-диспетчерского управления. Осуществлять по соглашению сторон: он устанавливает и обслуживает устройства, обеспечивающие регулирование реактивной мощности, либо оплачивает услуги по передаче электрической энергии, в том числе в составе конечного тарифа (цены) на электрическую энергию, поставляемую ему по договору электроснабжения, с учетом соответствующего повышающего коэффициента.

В Постановлении Правительства № 861 от 27.12.2004 г. оговорены определенные значения реактивной мощности – тангенс угла должен быть в сети напряжением 110 кВ – 0,5; 35 кВ – 0,4; 0,4 кВ – 0,35 [15]. Коэффициент реактивной мощности – это отношение реактивной мощности к активной, среднее значение которого должно составлять – 0,8. В энергосистеме Чеченской Республики данный коэффициент равен около – 0,3. При низком коэффициенте мощности токи превышают свои значения гораздо выше номинальных, что способствует нагреву оборудования и соответственно возникновению дополнительных потерь электроэнергии в сети.

В частности, в некоторых РЭС Чеченской энергосистемы был проведен анализ по определению установленной и подключенной мощности. Т.е. был произведен расчет подключенной мощности путем суммирования всех трансформаторных подстанций (ТП) 10(6)/0,4кВ по конкретным РЭС. При этом установленная мощность питающих подстанций 110/35/10 кВ оказалась значительно ниже подключенной. Такое значительное расхождение в установленной и подключенной мощности говорит о недогруженности многих ТП-10(6)/0,4 кВ, что приводит к дополнительным потерям электроэнергии.

Приведем сравнение установленной и подключенной мощности в некоторых РЭС:

- Урус-Мартановские РЭС – установленная мощность на подстанциях 110/35/10 кВ составляет 74500 кВА, а подключенная составляет – 112598 кВА;
- Веденские РЭС – 9600 кВА – 28368 кВА;
- Ножай-Юртовские РЭС – 14600 кВА – 21934 кВА;
- Грозненские РЭС – 22300 кВА – 41200 кВА;
- Ачхой-Мартановские РЭС – 15200 кВА – 44123 кВА.

Пример: Потребление электроэнергии за октябрь 2019 г. по Урус-Мартановскому району составил 17,0 млн. кВт.ч., а активная мощность при этом составляет 23611,1 кВт (17000000:720=23611,1). Следовательно, определяя коэффициент мощности (cosφ), определяемый как отношение полезной мощности к полной, учитывая при этом в

данном случае подключенную мощность (112598кВА) равен  $\cos\varphi \approx 0,2$  ( $23611,1:112598 \approx 0,2$ ).

Данный коэффициент мощности характеризует наличие большой реактивной мощности в сети, то есть это означает преобладание реактивной мощности над активной. Иначе говоря, наблюдается большой сдвиг фаз между током и напряжением, то есть большой процент электроэнергии идет на нагрев проводов при сложившемся коэффициенте мощности равном 0,2. То есть, при низком коэффициенте мощности, ток по проводам увеличивается создавая нагрев в них, соответственно растут потери электроэнергии в проводах. При уменьшении  $\cos\varphi$  в два раза, в 4 раза увеличиваются потери электроэнергии и наоборот. Поэтому надо стремиться к увеличению  $\cos\varphi$  и уменьшению величины передаваемой реактивной мощности (рис.1) [16].

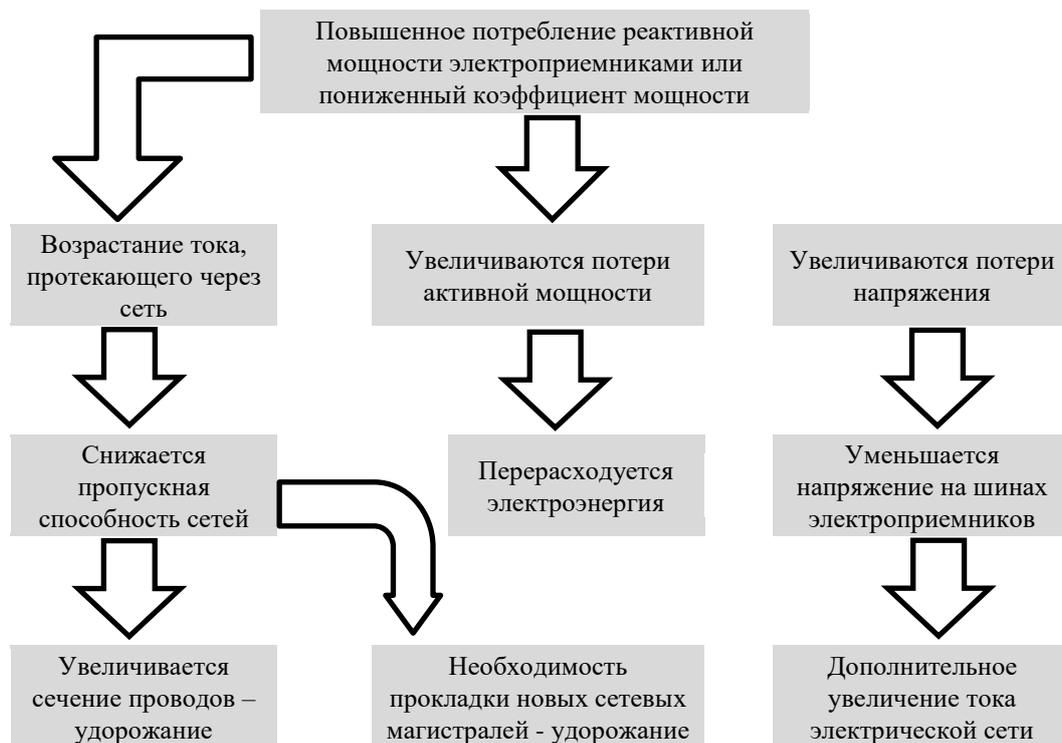


Рис. 1.Реактивная мощность и проблемы ее увеличения

При больших реактивных мощностях повышается напряжение. При повышении напряжения вызывается нагрев в сети, а это уже потеря электроэнергии. Чтобы этот процесс был под контролем надо постоянно регулировать реактивную мощность. Перенапряжение для сети вредный резонансный процесс, который может способствовать возникновению аварийного очага. Необходимо применение технических мер по регулированию баланса мощности, то есть предусмотреть реакторы для отбора мощности. Они в системе не предусмотрены. Возникает вопрос. Как улучшить технико-экономические показатели в энергосистеме? В помощь энергоснабжающим организациям, для решения вопроса по снижению потерь электроэнергии, Министерством энергетики РФ приказом №380 от 23 июня 2015 г. введен порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности. Согласно данному порядку для потребителей мощностью более 150 кВт предельно допустимые значения коэффициента реактивной мощности составляют 0,5 для сетей 110 кВ, 0,4 для сетей 6-35 кВ, 0,35 для сетей 0,4 кВ. При определении обязательств сторон в договорах об этом надо указать, также указать при выдаче технических условий для подключения потребителя к сетям АО «Чеченэнерго». В договоре надо оговаривать о штрафах за превышение тангенса  $\phi$  – коэффициента реактивной мощности. Поэтому непринятие соответствующих мер по повышению коэффициента мощности с установкой источников реактивной мощности, создает благоприятные условия роста потерь электроэнергии в электрических сетях. В соответствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ), для уменьшения потерь электроэнергии необходимо уменьшить сопротивление, то есть увеличить сечение провода.

Такая же картина наблюдается и по городским сетям.

По итогам Проектного обследования электрических сетей ВЛ-0,4-10кВ, выполнялись расчеты потерь по каждому трансформаторным пунктам в РЭС, а также проводились следующие мероприятия по снижению потерь электроэнергии:

- мероприятия по строительству, реконструкции, техническому перевооружению и развитию электрических сетей;
- мероприятия по совершенствованию расчетного и технического учета, метрологического обеспечения измерений электроэнергии;
- мероприятия по выявлению, предотвращению и снижению хищений электроэнергии;
- мероприятия по совершенствованию организации работ, стимулированию снижения потерь, повышению квалификации персонала, контролю его деятельности.

В результате проведения анализа потерь электроэнергии по РЭС, было выявлено, что снижение потерь в сетях 0,4-10кВ связано также со значительными перекосами напряжений по фазам, где наблюдается падение напряжения на нагруженных фазах. Повышенное напряжение может привести к выходу из строя электрических приборов и оборудования потребителей. Асимметрия напряжений возникает из-за разного падения напряжения в проводах линии при перекосах фазных токов, вызванных неравномерным распределением однофазных нагрузок. При этом в нулевом проводе четырехпроводной линии появляется ток, равный геометрической сумме фазных токов. В некоторых случаях (например, при отключении нагрузки одной или двух фаз) по нулевому проводу может протекать ток, равный фазному току нагрузки. Это приводит к дополнительным потерям в ВЛ 0,4 кВ, распределительных трансформаторах 10/0,4 кВ и, соответственно, в высоковольтных сетях. Подобная ситуация характерна для многих сельских районов и может возникнуть в жилых многоквартирных домах, где не представляется возможным равномерно распределить нагрузку по фазам, в результате чего в нулевом проводе появляются достаточно большие токи, что приводит к дополнительным потерям в проводниках групповых и питающих линий и вызывает необходимость увеличения сечения нулевого рабочего провода до уровня фазных. Перекосы напряжения сильно сказываются на потребителях. Так небольшая асимметрия напряжения (например, до 2%) на зажимах асинхронного двигателя приводит к значительному увеличению потерь мощности, что в свою очередь, вызывает дополнительный нагрев обмоток и снижает срок службы их изоляции, а при перекосах до 5% общие потери возрастают в 1,5 раза и, соответственно, растет потребляемый ток. Для компенсации перекоса напряжений целесообразно перераспределить токи нагрузки по фазам, выровнив их значения. Необходимость ограничения тока нулевого провода вызвана еще и тем, что в распределительных сетях 0,4 кВ, выполненных кабелем, сечение нулевого провода обычно принимается на ступень меньше сечения фазного провода. В целях уменьшения потерь электроэнергии в сетях 0,4 кВ за счет перераспределения токов по фазам, ограничение тока в нулевом проводе и снижение перекосов напряжения, предлагается использовать трехфазный балансирующий автотрансформатор. При этом, если на линии 0,4 кВ до узла нагрузки произойдет короткое замыкание (одной из фаз на нулевой провод), потребители будут защищены от перебоев электроэнергии, установленным автотрансформатором.

#### **Концепция реконструкции электрических сетей**

Стратегия построения разветвленной электрической сети 0,4 кВ направлена на повышение операционной эффективности, надежности работы сети, снижения уровня потерь. Принципиально новое построение электрических сетей предполагает разгрузку центров питания и модернизацию разветвленной сети 0,4 кВ с фиксированной электрической нагрузки. В населенных пунктах для потребителей будут монтироваться новые столбовые трансформаторные подстанции, что позволит сократить протяженность линий низкого класса напряжения и тем самым снизить потери электроэнергии. В целом такая модернизация позволит сократить протяженность линий низкого класса, поднять на новый уровень надежность и качество электроснабжения потребителей.

Реконструкция воздушных линий со столбовыми трансформаторными подстанциями увеличит пропускную способность сети 0,4 кВ, а также и возможности технологического присоединения новых потребителей в расширяющихся населенных пунктах. Кроме того, применение столбовых трансформаторных подстанций повысит электробезопасность, так как токоведущие части оборудования изолированы. Опыт применения в ряде регионов электросетевой компании 250-вольтдобавочных трансформаторов, позволил стабилизировать напряжение в сети, повысить надежность срабатывания защиты ВЛ.

Главная особенность планируемой концепции – это организации системы корпоративной связи по распределительным сетям 0,4 кВ, с учетом последних достижений

цифровой обработки сигналов, а также передачи информации и диагностики электролиний. Рассмотрение концепции решения проблемы передачи информации дистанционной диагностики ВЛ разных классов напряжения, а также получение достоверных сведений по потребленной электроэнергии потребителями, приведет к снижению потерь электроэнергии [4,11,17].

Наряду с этим стоит немаловажная проблема внедрения системы управления и диагностирования производственных активов АО «Чеченэнерго». Любые отклонения от нормальных режимов работы электрооборудования приводят к ухудшению качества электроснабжения, или прекращению отпуска электроэнергии потребителям, что влечет за собой экономические и социальные последствия. Чтобы исключить подобные случаи, их следует предупреждать. Техническое состояние оборудования – это техническое лицо энергосистемы, а в данном случае – АО «Чеченэнерго». Для этого необходимо в комплекс АО «Чеченэнерго» внедрить систему управления производственными активами. Данная система будет регулировать и координировать деятельность по управлению техническим состоянием, надежностью энергосистемы, оптимизировать затраты и повышать эффективность работы оборудования на всем протяжении его жизненного цикла с целью обеспечения электроснабжения. Главной задачей управления производственными активами является обеспечение баланса между затратами на оборудования и рисками его отказа. Это естественно позволит сократить затраты на содержание ВЛ и подстанций, а также устранить последствия аварий-отказов. В целом такая система позволит изменить принципы формирования плановых ремонтов и продлить сроки службы электрооборудования. Более того, будет способствовать искоренению практикующихся стереотипов в ремонтном процессе. В таких условиях функционирования энергосистемы на технического руководителя возлагается важная роль для принятия наиболее целесообразных решений по перспективному развитию электроэнергетики.

В данный момент наша система далеко отстала от многих ведущих энергосистем по уровню технического развития и по уровню управления режимами, из-за чего диспетчера теряют время на вывод в ремонт и ввод в работу оборудования. Эти вопросы требуют создания и внедрения автоматизированной системы управления на базе цифровой техники и современных средств связи.

Наиболее целесообразно иметь линии электропередач такими, чтобы отключение одной из них не приводило к нарушению устойчивости и надежности электроснабжения потребителей в массовом порядке. Схемы подстанций требуется пересмотреть так, чтобы была возможность придать им наибольшую гибкость при переключениях и резервирование при отключениях, тем самым минимизировать время прекращения электроснабжения потребителя.

С каждым годом все более широкое применение при строительстве силовых и осветительных воздушных электрических линий приобретает самонесущий изолированный провод (СИП). Такие линии электропередач принято обозначать аббревиатурой «ВЛИ». СИП имеет ряд преимуществ: простота монтажа, удобство в эксплуатации и сохранение соблюдения мер безопасности. Провод СИП способствует снижению потерь электроэнергии на воздушных линиях, вследствие уменьшения реактивного сопротивления более чем в 3 раза. Существенным преимуществом является допустимость подключения новых потребителей под напряжением, без отключения основных потребителей. При эксплуатации линий с проводом СИП исключено воровство электроэнергии путем несанкционированного подключения снаружи. Использование в сетях провода СИП уменьшает вероятность грозových перенапряжений в сетях.

Если в целом резюмировать ситуацию, то на стадии внедрения мероприятий по снижению потерь электроэнергии в сетях главную роль играет так называемый человеческий фактор [20]:

- обучение и повышение квалификации персонала;
- мотивация персонала, моральное и материальное стимулирование;
- оповещение персонала о целях и задачах снижения потерь.

Кроме того персонал необходимо мотивировать на выполнение требований, быть морально и материально заинтересованным в фактическом, а не формальном снижении потерь. Для этого обучение должно носить системный характер для всех уровней - от руководителей подразделений, служб и отделов до рядовых исполнителей. Руководители должны уметь ставить и решать задачи управления процессом снижения потерь в сетях, а исполнители – уметь решать конкретные задачи. Эти знания и умения должны подкрепляться системой поощрения, что приведет к снижению потерь электроэнергии в сетях. Вместе с тем необходимо включать и выявление хищений электроэнергии с

обязательным поощрением персонала. В связи с этим должен быть постоянный контроль со стороны руководителей энергосистемы, Энергосбыта и РЭС. В конечном счете требуется наладить экономический механизм поощрений в области снижения потерь.

### **Заключение**

Функционирование и перспективное развитие электроэнергетического комплекса Чеченской Республики требует создания стабильной многовекторной энергетики, которая может обеспечить высокий уровень надежного и бесперебойного электроснабжения потребителей. Встает задача эффективности использования производственных мощностей. Важно понимать, что все зависит от уровня доходов АО «Чеченэнерго», от грамотной системы управления, а также различных программ реконструкции и технического перевооружения электроэнергетического комплекса, которые реализуют дальнейшее развитие компании. Задачи снижения потерь электроэнергии должны вырабатываться и реализовываться с учетом существенных изменений в сетях. Необходимо понимать общую картину состояния оборудования, прежде чем вкладывать средства на модернизацию. Учитывая особый статус электроэнергетики в экономике и в социальном развитии Чеченской Республики, на первый план следует ставить вопросы обеспечения устойчивости и надежности электроснабжения потребителей республики. Для этого необходимо строить новые и перераспределять существующие мощности подстанций, строить резервные переточные линии электропередач. При правильном распределении финансовых ресурсов компания станет доходной и успешной. Необходимо также усиленно рассматривать возможные пути перевода действующего энергетического комплекса в другое состояние, основу которого будут составлять современные наукоемкие технологии.

### **Литература**

1. Нашхоев Р.М. Прошлое и настоящее // История электроэнергетики Чеченской Республики, Грозный, 2006. 432 с.
2. Керимов И.А., Минцаев М.Ш., Дебиев М.В. Основные этапы реализации программы развития энергетики Чеченской Республики // Материалы 4 Всероссийской научно-технической конференции «Геоэнергетика – 2019» / Грозный: НПП «Геосфера», 2019. С. 38-56.
3. Дебиев М.В. Анализ эффективности развития региональной энергетической промышленности (на примере Чеченской Республики): дис. канд. техн. наук: 13.05.01. Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2014. 212 с.
4. Воротницкий В.Э., Заслонов С.В., Калинкина М.А., и др. Методы и средства расчета, анализа и снижения потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям. М., 2006. 164 с.
5. Cossent R, Olmos L., Gómez T., et al. Distribution network costs under different penetration levels of distributed generation. *European Transactions on Electrical Power*. 2011. V. 21. №6. pp. 1869-1888.
6. Приказ Минэнерго России от 30 сентября 2014 г. №674 «Об утверждении нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций», Москва. Доступно по URL: <http://www.minenergo.gov.ru/node>. Ссылка активна на: 05.03.2020.
7. Железо Ю.С., Артемьев А.В., Савченко М.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях // Руководство для практических расчетов. - М. Изд-во ЭНАС, 2004. 280 с.
8. Инструкция по снижению технологического расхода электроэнергии на передачу по электрическим сетям. «ЕЭС Россети». Доступно по : <https://meganorm.ru/Index2/1/4294816/4294816579.htm>. Ссылка активна на: 2 декабря 2019.
9. Методика расчета потерь электроэнергии возникающих на участке электросети от граница балансовой принадлежности объектов электроэнергетики до места установки расчетного прибора учета на основе Приказа Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 «Об организации в Министерстве энергетики РФ работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям». Доступно по: <http://base.garant.ru/195516>. Ссылка активна на: 2 декабря 2019.
10. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года. Указ Президента Российской Федерации от 13 мая 2018 года. СПС КонсультантПлюс. Доступно по URL: <http://www.consultant.ru>. Ссылка активна на: 21 января 2020.
11. Jenkins J. D. Economic regulation of Electricity Distribution Utilities under high penetration of Distributed Energy Resources: applying an incentive compatible menu of contracts, reference network model and uncertainty mechanism. Boston: MIT, 2014. Ссылка активна на 12 апреля 2020.
12. Luo, X., Wang, J., Dooner, M., Clarke, J. «Over view of current development in electrical energy

storage technologies and the application potential in power system operation». *Applied Energy*. 2015. V. 137. pp.511-536.

13. Схема и программа развития электроэнергетики Чеченской Республики на 2018-2022 годы. Разработчик: Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, 2018. 96 с.

14. Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Ахматханов Р.С. Программа развития энергетики Чеченской Республики на 2011-2030 гг. // Наука и образование в Чеченской Республике: состояние и перспективы развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 10-летию со дня основания КНИИ РАН (7 апреля 2011 г., Грозный). Грозный, 2011. С. 38-63.

15. Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 N 861 (ред. от 30.04.2020) «Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам администратора торговой системы оптового рынка и оказания этих услуг и Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям. Ссылка активна на: 4 июня 2020.

16. KajaPrimc, Renata Slabe-Erker. Social policy or energy policy? Time to reconsider energy poverty policies. *Energy for Sustainable Development*. 2020. V.55. pp. 32-36. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.01.001>.

17. Aldo J.Gil Perez, Teis Hansen. Technology characteristics and catching-up policies: Solar energy technologies in Mexico. *Energy for Sustainable Development*. 2020. V.56, pp. 51-66. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.03.003>.

18. Энергетическая стратегия на период до 2030 года. Доступно по:URL: <http://www.minenergo.gov.ru/activity/energostrategy>. Ссылка активна на: 16 март а 2013.

19. Pflugradt, N., Teuscher, J, Platzer, B., et al .Analysing Low-Voltage Grids using a Behaviour Based Load Profile Generator.: International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Bilbao, 2013.

20. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Analytic Research Foundations for the Next-Generation Electric Grid. Washington DC: The National AcademiesPress, 2016. Accessed to: 29.Apr 2020.

### Авторы публикации

**Масаев Сулиман Хамидович** – Заместитель генерального директора – руководитель электросетевого комплекса по Чеченской Республике ПАО «Россети Северный Кавказ», Грозный, Россия.

**Макаев Умар Хамидович** – тех. д-р. Ремонтно-строительной фирмы ООО «Мир» г. Грозный, Россия.

**Дебиев Майрбек Вахаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электропривод» Грозненского государственного нефтяного технического университета им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия.

### References

1. Nashkhoev RM. *Past and Present. History of the Electric Power Industry of the Chechen Republic*, Grozny, 2006.432 p.

2. Kerimov IA, Mintsaeв MSh, Debieв MV. The main stages of the implementation of the energy development program of the Chechen Republic. *Materials of the IV All-Russian scientific and technical conference "Geoenergy - 2019"*. Ed. Doctor of Technical Sciences Mintsaeва M.Sh. Grozny: NPP Geosphere, 2019. pp. 38-56.

3. Debieв MV. *Analysis of the development efficiency of the regional energy industry (on the example of the Chechen Republic)*: dis. Cand. tech. Sciences: 13.05.01. Volgograd state. tech. un-t Volgograd, 2014. 221 p.

4. Vorotnitsky VE, Zaslonoв SV, Kalinkina MA., et al. *Methods and means of calculating, analyzing and reducing losses of electric energy during its transmission through electric networks*. M., 2006.164 p.

5. Cossent R., Olmos L., Gómez T., et al. Distribution network costs under different penetration levels of distributed generation. *European Transactions on Electrical Power*. 2011;21(6):1869-1888.

6. *Order of the Ministry of Energy of Russia dated September 30. 2014. N. 674. On approval of standards for the loss of electric energy when it is transferred through the electric grids of territorial grid*

organizations, Moscow. Available at: URL: <http://www.minenergo.gov.ru/node>. Accessed to: 05 March 2020.

7. Iron YuS, Artemyev AV, Savchenko MV. Calculation, analysis and rationing of electric power losses in electric networks. *Manual for practical calculations*. M. Publishing House of ENAS, 2004. 280 p.

8. *Instructions for reducing the technological energy consumption for transmission over electric networks*. EES Rosseti. Available at :<https://meganorm.ru/Index2/1/4294816/4294816579.htm>. Accessed to: 02 dec 2019.

9. The methodology for calculating the energy losses arising in the section of the power supply network from the boundary of the balance sheet of electric power facilities to the place of installation of the metering meter on the basis of Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of December 30. 2008 N. 326. *On the organization in the Ministry of Energy of the Russian Federation of work on the approval of standards for technological losses of electricity when it is transmitted over electric networks*. Available at: <http://base.garant.ru/195516>. Accessed to: 2 dec 2019.

10. *On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024*. Decree of the President of the Russian Federation of May 13, 2018. SPS Consultant Plus. Available at: URL: <http://www.consultant.ru/>. Accessed to: 21 Jan 2020.

11. Jenkins JD. Economic regulation of Electricity Distribution Utilities under high penetration of Distributed Energy Resources: *applying an incentive compatible menu of contracts, reference network model and uncertainty mechanism*. Boston: MIT, 2014.

12. Luo X, Wang J, Dooner M. et al. Over view of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*. 2015;137:511-536.

13. *Scheme and program for the development of the electric power industry of the Chechen Republic for 2018-2022*. Developer: Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionschikova, Grozny, 2018. 96 p.

14. Kerimov IA, Gaysumov MYa, Akhmatkhanov RS. *Energy Development Program of the Chechen Republic for 2011-2030. Science and education in the Chechen Republic: state and development prospects*. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 10th anniversary of the foundation of the KNII RAS (April 7, 2011, Grozny). Grozny, 2011. pp. 38-63.

15. Decree of the Government of the Russian Federation of December 27, 2004. N. 861 (as amended on April 30, 2020). On the approval of the Rules of non-discriminatory access to electric energy transmission services and the provision of these services. *Rules of non-discriminatory access to operational dispatch management services in the electric power industry and the provision of these services, objects for the production of electric energy, as well as objects of electric grid facilities belonging to network organizations and other persons to electric network*. Accessed to: 04 Jun 2020.

16. Kaja Primc, Renata Slabe-Erker. Social policy or energy policy? Time to reconsider energy poverty policies. *Energy for Sustainable Development*. 2020;55:32-36. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.01.001>.

17. Aldo J.Gil Perez, Teis Hansen. Technology characteristics and catching-up policies: Solar energy technologies in Mexico. *Energy for Sustainable Development*. 2020;56:51-66. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.03.003>.

18. *Energy strategy for the period until 2030*. Available at: URL: <http://www.minenergo.gov.ru/activity/energostrategy>. Accessed to: 16 March 2013.

19. Pflugradt N, Teuscher J, Platzer B, et al. *Analysing Low-Voltage Grids using a Behaviour Based Load Profile Generator*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Bilbao, 2013. Accessed to: 05 Apr 2020.

20. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Analytic Research Foundations for the Next-Generation Electric Grid*. Washington DC: The National Academies Press, 2016. Accessed to: 29 Apr 2020.

### **Authors of the publication**

**Suliman Kh. Mасаев** – PJSC Rosseti North Caucasus Grozny, Russia.

**Umar Kh. Макаев** – Repair and construction company LLC «Mir», Grozny, Russia.

**Mairbek V. Дебиев** – GGNTU named after academician M.D. Millionschikova, Grozny, Russia.

**Поступила в редакцию**

**07 мая 2020г.**



## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНЕЙНО НАГРУЖЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, ОБРАЗОВАННОГО ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ

Галеев Л.М.

Казанский Национальный Исследовательский  
Технический Университет им. А. Н. Туполева - КАИ,  
г. Казань, Россия  
galeev.linar93@gmail.com

**Резюме:** Статья посвящена комплексному исследованию влияния электромагнитного поля, образованного плоской волной, определенной функцией времени, направлением падения и поляризации, с линейно нагруженной электрической сетью, состоящей из трех проводников различной длины, соединённых в центре. Линейная нагрузка представляет собой резисторы номиналом 50 Ом, подключенные ко всем концам электрической сети. Сеть моделируется на ЭВМ и экспериментально исследуется в гигагерцовой поперечной электромагнитной GTEM камере, позволяющей создать электромагнитное поле известного направления. Наведенное напряжение в электрической сети исследуется в частотной и временной областях.

Для проведения эксперимента в частотной области как для создания электромагнитного поля внутри GTEM камеры, так и для измерения наведенного напряжения на концах электрической сети, использовался векторный анализатор электрических цепей VNA. Для проведения эксперимента во временной области при создании электромагнитного поля использовался высоковольтный генератор напряжения, а при измерении наведенных напряжений стробирующий осциллограф.

Моделирование выполнено в программных комплексах LTspice – инструменте для расчётов электрических и электронных цепей, и Matlab. Оно также проверено на соответствие с результатами эксперимента.

На основе полученных результатов автору удалось выделить основные аспекты, которые могут быть полезны при моделировании и прогнозировании электромагнитных процессов возникающих в проводниках и системах электропитания и/или передачи данных, нагруженных на линейную нагрузку.

**Ключевые слова:** электрическая сеть, плоская электромагнитная волна, наведённое напряжение, моделирование, эксперимент.

**Для цитирования:** Галеев Л.М. Исследование напряжения в линейно нагруженной электрической сети, образованного плоской электромагнитной волной // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4 С. 54-63. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-54-63.

## INVESTIGATION OF THE PLANE WAVE COUPLING TO A LINEARLY LOADED TRANSMISSION LINE NETWORK

LM. Galeev

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,  
Kazan, Russia  
galeev.linar93@gmail.com

**Abstract:** The article is concerned with a complex investigation of the influence of the plane wave coupling with a certain function of time, incident direction and polarization to a linearly loaded transmission line network comprised of three single-wire conductors with different lengths connected in the center. Line load is represented as 50 Ω resistors connected to all terminations of the transmission line network. The exemplary network was modeled on a computer and experimentally investigated in a gigahertz transverse electromagnetic GTEM cell,

which allows creating an electromagnetic field of a certain direction. The coupled voltage at the terminals of the network was investigated in the frequency and time domains.

To conduct an experiment in the frequency domain, both to create an electromagnetic field inside the GTEM camera and to measure the induced voltage at the terminations of the network, a vector network analyzer VNA was used. To conduct an experiment in the time domain for the sake of creating an electromagnetic field, a high-voltage voltage generator was used, whereas a strobing oscilloscope was used to measure the induced voltages.

The simulation was performed in the LTspice software - a tool for calculating electrical and electronic circuits, and Matlab. It is also examined to show the compliance with the experimental results.

On the basis of obtained results, the author was able to identify the main aspects that may be useful in modeling and predicting the electromagnetic processes occurring in linearly loaded conductors, power supply and / or data transmission systems.

**Key words:** transmission line network, plane wave, coupled voltage, modelling, experiment.

**For citation:** Galeev LM. Investigation of the plane wave coupling to a linearly loaded transmission line network. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):54-63. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-54-63.

### Введение

Системы электроснабжения, сети передачи данных и соединительные кабели часто являются важными путями связи для нежелательных электромагнитных полей и помех в устройствах, системах и подвижных объектах. Множество методов существует для расчета одиночных проводников [1-3]. На практике проводники, могут быть соединены вместе, образуя, например, как электрические сети промышленного предприятия, так и информационные сети самолета, подверженные воздействию внешних электромагнитных полей, образованных от мощных электронных устройств, грозовых разрядов или мощных преднамеренных электромагнитных воздействий [4]. Моделирование процессов описывающих влияние электромагнитных полей с электрическими сетями сложны, но были описаны в [5, 6] для линейных нагрузок в частотной области и в [7-9] во временной области.

На первом этапе в данной работе исследуется единичное воздействие плоской электромагнитной волны, возникающей в ячейке GTEM, на электрическую сеть и наведенные токи и напряжения. Далее, результаты на основе математической модели, созданной в комплексе LTspice [10,11] сравниваются с результатами математической модели, построенной в программном комплексе Matlab и основанной на уравнениях Baum-Liu-Tesche (BLT) в частотном диапазоне [8]. Этот способ широко используется для моделирования и анализа электрических сетей, позволяющий точно оценить переходные процессы, возникающие в них. Кроме того, результаты моделирования сравниваются с уже проведенными измерениями в GTEM камере.

Статья построена следующим образом: для проверки имитационной модели несколько измерений выполняются в камере GTEM. В начале, описаны экспериментальная установка и процедуры измерений. Затем, описывается имитационная модель. И, наконец, представляются результаты для линейно нагруженной сети в частотном диапазоне.

Целью данной работы является исследование наведенного напряжения, образованного плоской электромагнитной волной, на конце линейно нагруженного проводника, входящего в состав электрической сети.

### Структура электрической сети

Исследуемый образец электрической сети представляет собой три однопроводные линии с площадью поперечного сечения  $4 \text{ мм}^2$ , соединенные в центре. Первый и второй проводники имеют длину  $l_1 = 0,3 \text{ м}$  и  $l_2 = 0,4 \text{ м}$  соответственно. Эти проводники перпендикулярны друг другу. В базовой конфигурации длина третьей линии равна  $l_3 = 0,5 \text{ м}$ , а угол относительно мнимого продолжения первой линии равен  $30^\circ$ . Схематичное изображение и фотография образца электрической сети внутри GTEM камеры представлены на рис. 1. Подключение измерительных коаксиальных кабелей к концу исследуемой линии производилось через отверстия в полу камеры.

Все проводники имеют радиус  $r = 1,128 \times 10^{-3} \text{ м}$ , а высота проводников над плоскостью земли  $h = 0,015 \text{ м}$ .

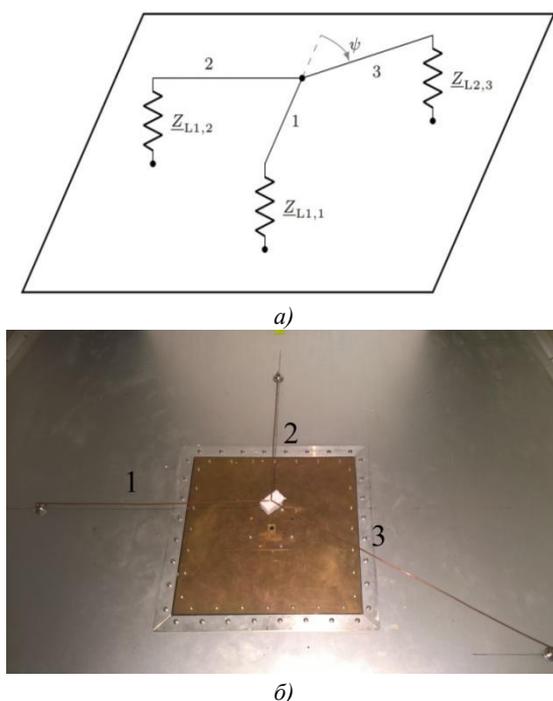


Рис. 1. Образец электрической сети:  
 а – схема электрической сети; б – фото электрической сети внутри *GTEM* камеры  
 1 – проводник  $l_1$ , 2 – проводник  $l_2$ , 3 – проводник  $l_3$

Данная сеть является примером произвольной электрической сети передачи данных, расположенной, например, над электропроводящим слоем в самолете с фюзеляжем из композиционного материала. Использование заземляющей поверхности оправдано тем, что в данных видах самолетов фюзеляж не может выступать в качестве «обратного проводника», и как следствие возможно нарушение электромагнитной обстановки на борту или сбои в работе оборудования.

#### Экспериментальная установка и процедура измерений

Экспериментальные установки представляют собой *GTEM* камеру с помещенной в неё испытательным образцом (рис.2). Структурно, *GTEM* камера представляет собой линию передачи 50 Ом. Входной порт линии передачи переходит во внутренний волновод треугольной формы, оканчивающийся электромагнитными поглотителями для испытаний на высоких частотах и нагрузкой 50 Ом для испытания на низких частотах. На входной порт *GTEM* камеры подается сигнал с генератора напряжения. Электрическая сеть закреплена на полу камеры и с помощью проходных коаксиальных разъемов подключалась к электронным устройствам для снятия сигнала.

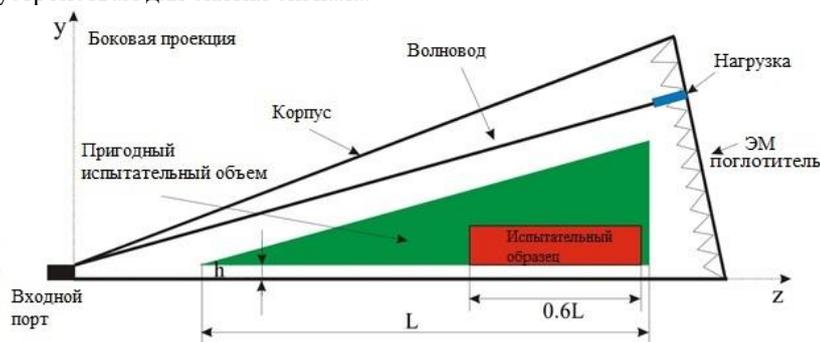


Рис. 2. Боковая проекция *GTEM* камеры [12]

Для измерений в частотном диапазоне использовался двухканальный векторный анализатор электрических цепей *VNA* [13] (рис. 3). Согласно [14] первый канал был подключен к входному порту *GTEM* камеры, когда как второй канал был подключен к 50 Ом коаксиальному разъёму на каждом из концов электрической сети поочередно.

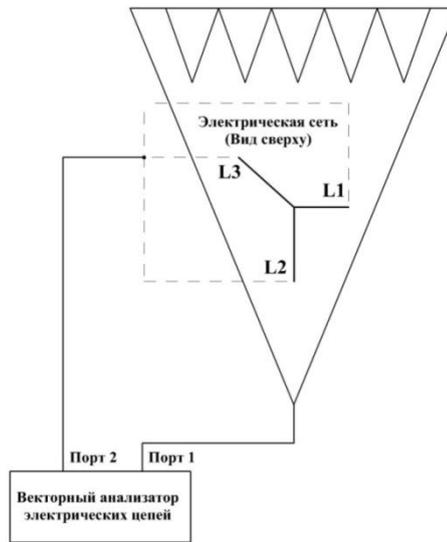


Рис. 3. Экспериментальная установка с использованием векторного анализатора электрических цепей

Для исследования электрической сети с нелинейными нагрузками при измерениях во временном диапазоне использовался осциллограф (рис. 4). Чтобы не повредить цифровой осциллограф, было использовано несколько аттенуаторов. Перед экспериментом импульс, подаваемый в *GTEM* камеру, должен быть исследован. Следовательно, выходной порт высоковольтного генератора напряжения был подключен непосредственно к осциллографу через аттенуатор 60 дБ. На рис. 5 видно, что первоначальный импульс является биполярным и довольно близок к форме синуса затухающей синусоиды.

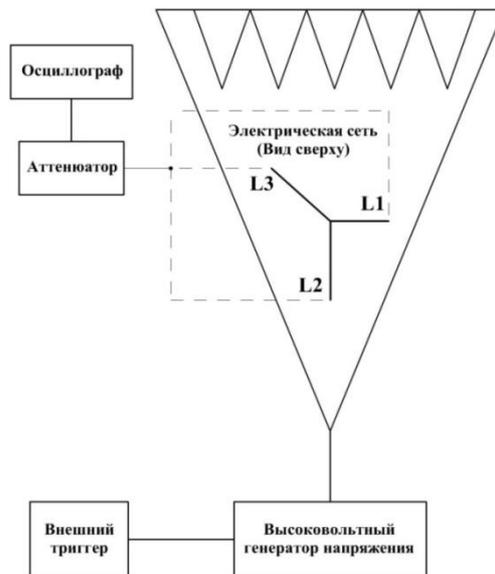


Рис. 4. Экспериментальная установка с использованием осциллографа

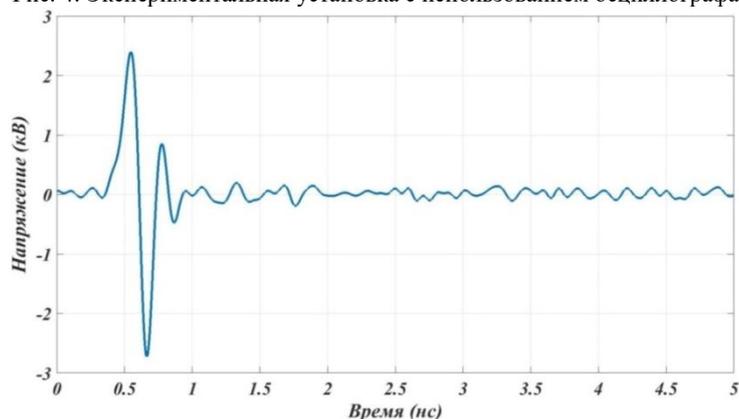


Рис. 5. Пусковой импульс высоковольтного генератора

### Имитационная модель электрической сети

Для проверки результатов экспериментов испытательный образец был смоделирован в *SPICE* программном обеспечении для построения электронных схем *LTspice* [15]. Принципиальная схема сети приведена на рис. 6. Здесь  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  представлены в виде проводников с волновым сопротивлением.

$$z_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{h}{r_0}\right) \quad (1)$$

На основе формулы (1) получаем значение равно 197 Ом. Где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость, а  $\mu$  – магнитная проницаемость. Проводники подключены к земле, поэтому общая длина проводников должна быть рассчитана с учетом длины вертикальных спусков и межслойных соединений ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) ~5 см.

Воздействующая плоская электромагнитная волна в программном комплексе *LTspice* представлена как кусочно-линейная функция измеренного сигнала с генератора импульсов высокого напряжения (рис. 5). Независимые источники напряжения  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  представляют собой источники напряжения, образованные плоской электромагнитной волной.

### Результаты исследования напряжения в электрической сети в частотной области

Вначале параметры рассеяния до частоты 1 ГГц были измерены и сопоставлены друг с другом (рис. 7). На рис. 7 представлен выходной коэффициент отражения  $S_{22}$ . Следует отметить, что первый резонанс возникает на частоте около 180 МГц.

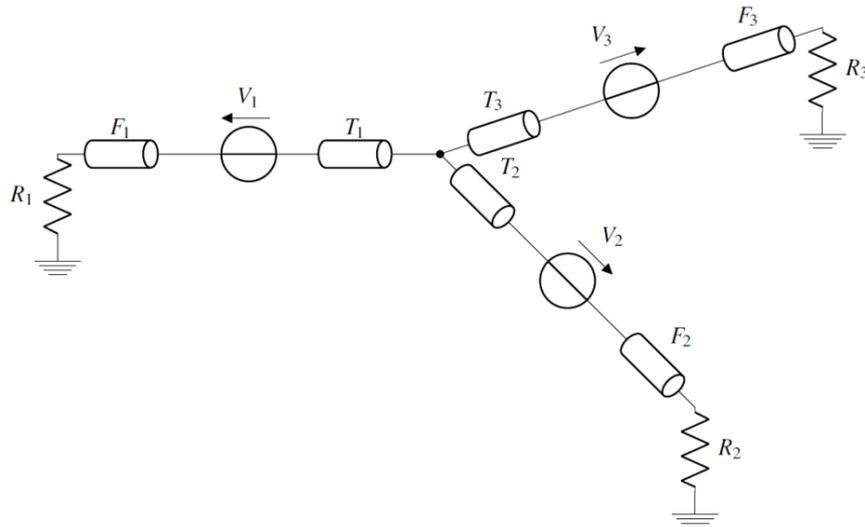


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема сети с линейной нагрузкой на концах

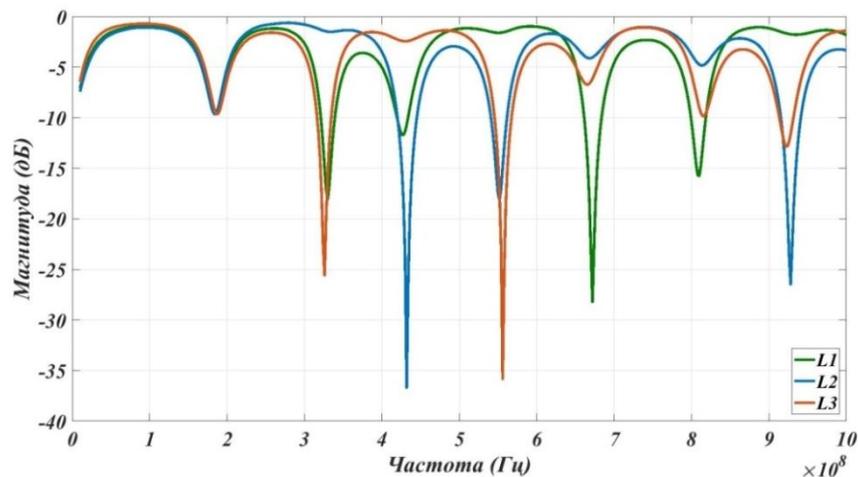


Рис. 7. Выходной коэффициент отражения  $S_{22}$  для трех линий:  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$

Для преобразования измеренных параметров рассеяния в наведенное напряжение используется формула из [16]:

$$\frac{U}{E} = \frac{|S_{21(12)}| \cdot h}{1 - |S_{11}|^2}$$

Здесь  $E$  – напряженность электрического поля,  $U$  – наведенное напряжение,  $S_{21}$  и  $S_{11}$  – абсолютные значения коэффициента прямой передачи и коэффициента отражения на входе, а  $h$  – высота сети над проводящей заземляющей плоскостью.

На рис. 8 представлено наведенное напряжение в электрической сети на всех трех концах линий.

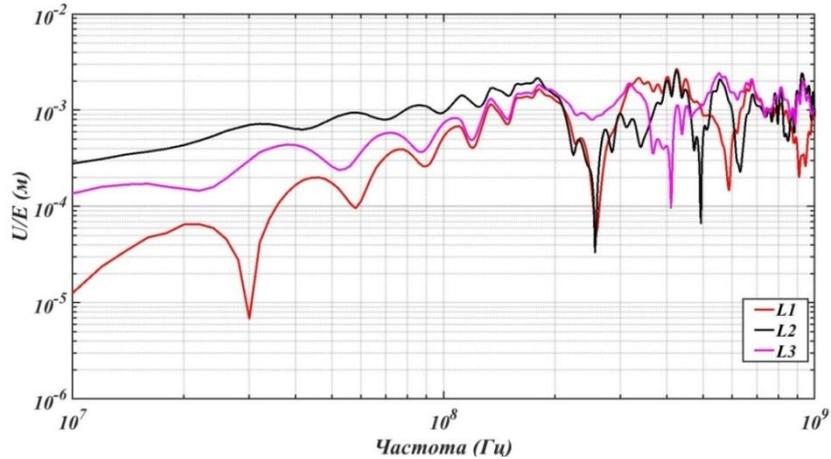


Рис. 8. Наведенное напряжение на концах проводников электрической сети:  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$

Для оценки адекватности результатов, значения наведенных напряжений из временной области, полученные для математической модели электрической сети описанной в разделе «Имитационная модель электрической сети», были преобразованы в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье. Полученные значения были сопоставлены между собой.

На рис. 9 представлены сравнительные результаты измеренных и смоделированных наведенных напряжений на конце второго проводника электрической сети. Видно, что общая форма кривых практически идентична. Основные резонансы зависят от длины проводников в электрической сети, различны только амплитуды резонансов. Это объясняется пренебрежением возможными потерями в электрической сети при моделировании. При частотах ниже 200 МГц количество резонансов в экспериментальной части значительно больше. Можно отметить, что резонансы появляются на частотах около 190 МГц, 330 МГц, 440 МГц, 570 МГц, 690 МГц, 820 МГц и 950 МГц (рис. 9). Эти резонансы соответствуют симметрично несогласованной электрической сети, где они возникают для длин линий, кратных  $\lambda/2$ .

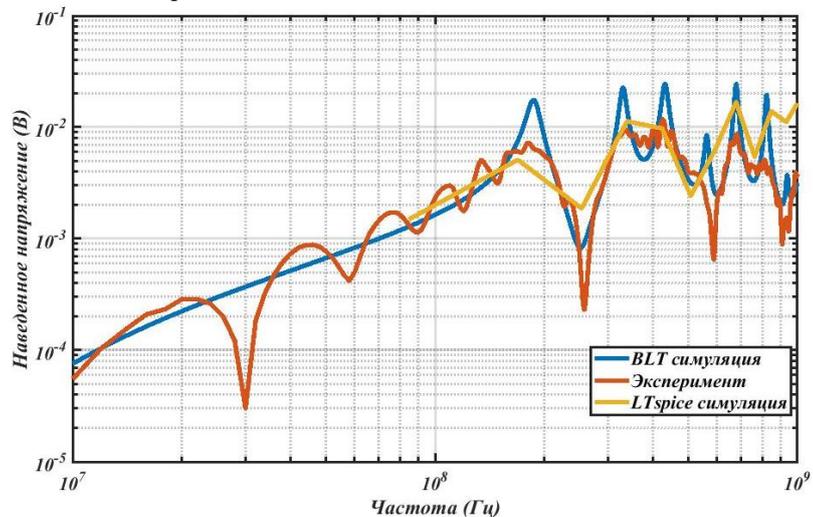


Рис. 9. Сравнение между измеренными и рассчитанными значениями наведенного напряжения в частотной области на конце второго проводника, подключенного к нагрузке в 50 Ом

Таким образом, исходя из хорошего согласования результатов моделирования в различных программных комплексах и эксперимента, программное обеспечение *LTspice* может быть использовано для вариантов с линейной нагрузкой во временной области.

### Результаты исследования напряжения в электрической сети во временной области

В этом разделе рассматриваются результаты, исследования электрической сети, полученные во временной области. На рис. 10 представлены наведенные напряжения на конце линий линейно нагруженной электрической сети. По осциллограммам можно наблюдать задержку, между возникновением наведенного напряжения в различных проводниках электрической сети, возникающую из-за различных расстояний между источником электромагнитных импульсов и проводниками. Задержка распространения сигнала в проводниках определяется как

$$T_d = \frac{l_i}{c} \quad (2)$$

где  $l_i$  – длина  $i$ -й линии сети, а  $c$  – скорость света.

Линия 2 находится ближе всего к источнику, поэтому напряжение на ней наводится в первую очередь. Согласно формуле (2) через время 1 нс возникает напряжение на линии 1. Это время соответствует длине проводника равного 30 см. Линия 3 находится дальше всего, и напряжение здесь возникает в последнюю очередь.

При более детальном рассмотрении формы наведенного напряжения на линии 2 видно, что вначале оно имеет небольшие колебания. Пики возникают каждые 0,1 нс. Это значение соответствует времени, в течение которого волна напряжения (или тока) должна распространиться вдоль вертикального спуска в начале линии 2 и обратно (0,03м).

Значение времени распространения, при котором волна напряжения (или тока) должна достичь противоположных концов линий электрической сети и вернуться обратно после отражения согласно (2), суммированы и представлены ниже для: 60 см: 2 нс; 140 см: 4,67 нс; 160 см: 5,34 нс.

Пики наведенного напряжения в указанных точках совпадают со значениями, представленными на рис. 10.

На рис. 11 представлено сравнение результатов моделирования и измеренных значений наведенного напряжения на линии 2. Первый пик хорошо сочетается с математическим моделированием. Наблюдается отклонение только по амплитуде, различие которой может быть вызвано пренебрежением потерями в проводниках в математической модели. В таком случае тенденция изменения форм обоих наведенных напряжений аналогична. Примерно через время в 4нс между результатами моделирования и измерений возникают значительные различия. Здесь запланированы дальнейшие исследования имитационной модели электрической сети.

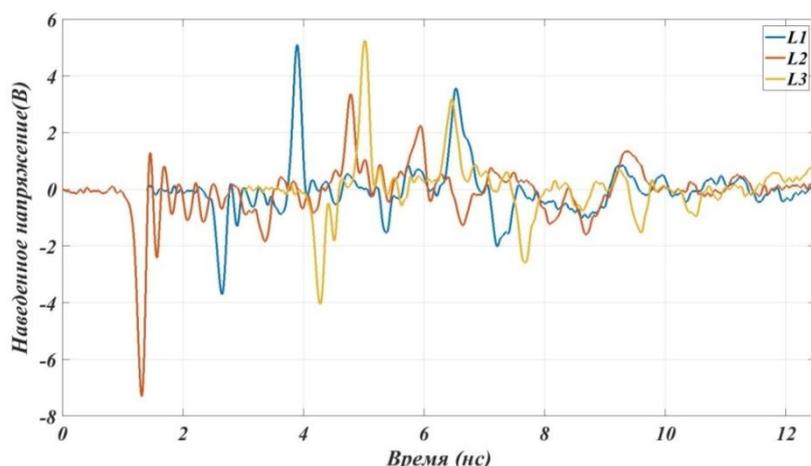


Рис. 10. Наведенные напряжения на концах линейно нагруженной электрической сети во временной области

Сравнение результатов во временной области, полученных в программном комплексе *LTspice*, с экспериментом показало, что амплитуды первых пиков совпадают по времени и величине, но затем отклонения становятся все более различны, что требует дальнейшей проработки математической модели.

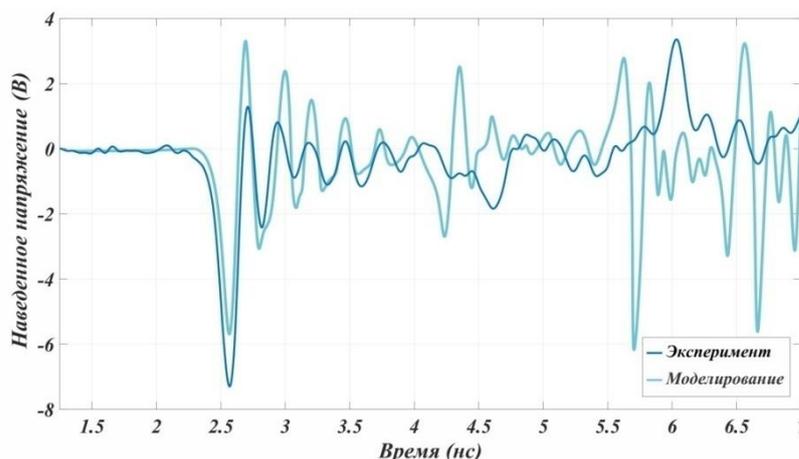


Рис. 11. Наведенное напряжение на конце второго проводника при линейно нагруженной электрической сети

**Обсуждение результатов исследования**

С помощью программного комплекса *MATLAB* измеренное наведенное напряжение во временном диапазоне было конвертировано посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ) в частотный диапазон. Полученные результаты были сопоставлены с результатами эксперимента в частотном диапазоне. На рис. 12. представлено сравнение результатов для второго проводника.

Видно, что основные резонансы имеют, примерно, одинаковые значения. Имеются различия только по уровням напряжений. В табл. 1 представлено сравнение уровней напряжений (дБ) в точках резонансов.

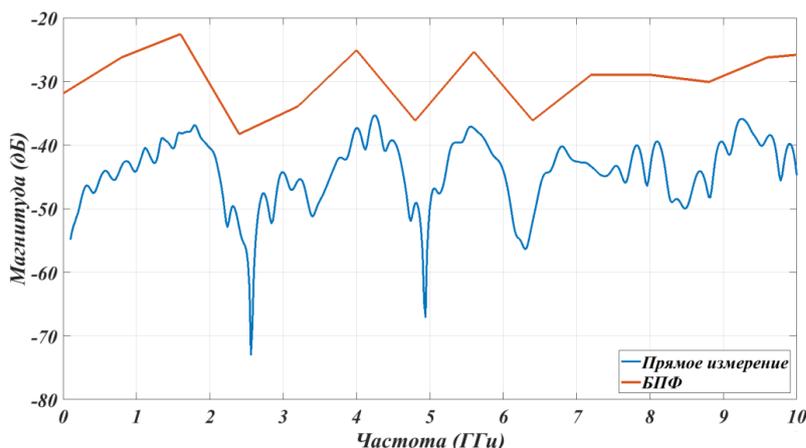


Рис. 12. Сравнение между измеренной АЧХ и АЧХ полученной с помощью БПФ на конце второго проводника

Таблица 1

Сравнение уровней напряжения в точках резонанса для второго проводника

| Частота (МГц) | Уровни напряжений (дБ) при прямом измерении | Уровень напряжения (дБ) при БПФ |
|---------------|---|---------------------------------|
| 180           | -38   | -22                             |
| 420           | -38   | -25                             |
| 560           | -38   | -25                             |

Разница в уровнях напряжений объясняется различным оборудованием, которое использовалось в экспериментах в частотном и временном диапазонах.

**Заключение**

1. Связь «электромагнитное поле – электрическая сеть» играет важную роль в прогнозировании характеристик электромагнитной совместимости технических систем.
2. Результаты данной статьи могут быть использованы при моделировании и прогнозировании электромагнитных процессов возникающих в проводниках и системах электропитания и / или передачи данных, нагруженных на линейную нагрузку.

3. В данной работе электромагнитные помехи в электрической сети, обусловленные плоской электромагнитной волной, были исследованы экспериментально в *GTEM* камере в частотной и временной областях, а также с помощью математического моделирования.

4. На первом этапе электрическая сеть была исследована в частотном диапазоне, и для проверки модели *LTspice*, результаты были сопоставлены с уже существующей имитационной моделью, основанной на уравнениях *BLT* и построенной в программном комплексе *Matlab*. Сравнение полученных результатов продемонстрировало хорошее согласование в частотном диапазоне.

5. Исходя из хорошего согласования результатов моделирования в различных программных комплексах и эксперимента, программное обеспечение *LTspice* может быть использовано для вариантов с линейной нагрузкой во временной области.

6. Практическое применение подхода изложенного в данной статье может быть полезно при разработке конкретных методик по прогнозированию электромагнитной совместимости технических систем (электроснабжения, передачи данных и т.д.) на различных объектах (промышленных предприятиях, летательных аппаратов и т.д.) при воздействии внешних электромагнитных полей.

### Литература

1. Perez R., Ed. Handbook of Electromagnetic Compatibility // 1st ed. London: Academic Press, Jan. 1995.
2. King R. W. P. Transmission-Line Theory // New York: McGraw-Hill Book Company, 1955.
3. Warne SLK. Campione, Coasts R.S. Plane Wave Coupling to a Transmission Line Above Ground with Terminating Loads. Advanced Electromagnetics. 2019. V. 8(1). pp. 82-90.
4. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Электромагнитная совместимость перспективных авиационных комплексов // Технологии ЭМС. 2018. № 2(65). С. 62-78,
5. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Зиятдинов И.Н., и др. Моделирование электромагнитных полей линий электропередач на основе теории масштабного эксперимента // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. труд. Междунар. науч.-практ. конф. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2014. С. 269-272.
6. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015. № 1-2. С. 115-122.
7. Гизатуллин Р.М. Сквозное прогнозирование помехоустойчивости вычислительной техники внутри зданий при кондуктивных электромагнитных воздействиях по сети питания // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. №5-6. С. 45-53.
8. Paul C.R., Analysis of Multiconductor Transmission Lines // 2nd ed., ser.IEEE Press. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008.
9. Agrawal A.K., Price H.J and Gurbaxani S.H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuni form electromagnetic field. // IEEETrans. Electromagn. Compat.V. 22. № 2. pp. 119-129.
10. Engelhardt M., LTspice XVII, Analog Devices // Norwood, MA, USA, 2019, <https://www.analog.com/en/design-center/designtools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
11. Xie H., Wang J., Fan R., et al. Application of a SPICE model for multiconductor transmission lines in electromagnetic topology // Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS, vol. 20, Cambridge, USA, Jul. 2008, pp. 237-241.
12. Kotwal P., Verma G., Katti P.K. Modelling and Analysis of Gigahertz Transverse Electromagnetic Mode (GTEM) Cell // 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), July 2019.
13. Test Equity. Rohde and Schwarz ZNLE3, ZNLE6 Vector Network Analyzers // 13 August 2018. <https://www.testequity.com/products/34631/>.
14. Лютаев С. Методы испытаний кабельных жгутов на электромагнитную совместимость // СВЧ-электроника. 2017. №2. С. 64-67
15. Wuysand D I., De Zutter. Circuit model for plane-wave incidence for multiconductor transmission lines // IEEE Trans. Electromagn. Compat. V. 36. № 3. pp. 206-212.
16. Microwaves 101. S-parameters, 28 June 2017 // <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/s-parameters>.

### Автор публикации

**Галеев Линар Маратович** – аспирант, Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ. E-mail: [galeev.linar93@gmail.com](mailto:galeev.linar93@gmail.com)

## References

1. Perez R, Ed. *Handbook of Electromagnetic Compatibility*. 1st ed. London: Academic Press, Jan. 1995.
2. King RWP. *Transmission-Line Theory*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1955.
3. Warne SLK, Campione, Coasts R.S. Plane Wave Coupling to a Transmission Line Above Ground with Terminating Loads. *Advanced Electromagnetics*. 2019;8(1):82-90.
4. Gaynutdinov RR, Chermoshentsev SF. Electromagnetic compatibility of perspective aviation complexes. *Technologies of electromagnetic compatibility*. 2018;2(65):62-78.
5. Gizatullin ZM, Gizatullin RM, Ziatdinov IN, et al. *Modeling of electromagnetic fields of transmission lines based on the theory of a large-scale experiment*. Modern Innovations in Science and Technology Symposium. Kursk. 2014. pp. 269-272.
6. Gizatullin ZM, Gizatullin RM, Nuriev MG. Mathematical models for physical modeling problems of electromagnetic compatibility. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(1-2):115-122. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-1-2-115-122>.
7. Gizatullin RM. End-to-end prediction of noise immunity of computer equipment inside buildings with conductive electromagnetic effects on the power supply network. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2012. pp.45-53.
8. Paul CR., *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, 2nd ed., ser. IEEE Press. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008.
9. Agrawal AK, Price HJ and Gurbaxani SH. *Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field*. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1980;22(2):119–129.
10. Engelhardt M, LTspice. XVII. *Analog Devices*. Norwood, MA, USA, 2019, <https://www.analog.com/en/design-center/designtools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
11. Xie H, Wang J, Fan R, et al. *Application of a SPICE model for multiconductor transmission lines in electromagnetic topology*. In Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS. Cambridge, USA, Jul. 2008;20:237–241
12. Kotwal P, Verma G, Katti PK. *Modelling and Analysis of Gigahertz Transverse Electromagnetic Mode (GTEM) Cell*. 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), July 2019.
13. *Test Equity*. Rohde and Schwarz ZNLE3, ZNLE6 Vector Network Analyzers, 13 August 2018. <https://www.testequity.com/products/34631/>.
14. Lytaev S. EMC cable harness test methods. *Microwave electronics*. 2017; 2:64-67.
15. Wuyts I and Zutter DDe. Circuit model for plane-wave incidence formulticonductor transmission lines. IEEE Trans. *Electromagn. Compat*. 1994;36(3):206–212.
16. *Microwaves 101. S-parameters*, 28 June 2017. <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/s-parameters>.

## Authors of the publication

**Linar M. Galeev** – Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. E-mail: [galeev.linar93@gmail.com](mailto:galeev.linar93@gmail.com).

*Поступила в редакцию*

*05 июня 2020 г.*



## ПОСТРОЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С АВТОНОМНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.Г. Городнов

Казанский национальный исследовательский технологический университет  
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия  
gorodnov\_kai@mail.ru

**Резюме:** Повышение энергоэффективности и снижение затрат на создание электротехнического комплекса автономного электроснабжения нефтедобывающего предприятия является актуальной проблемой и требует рационального решения. На каждом этапе развития электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия имеет место задача повышения энергоэффективности с целью сокращения удельных затрат электроэнергии на единицу объема добываемой скважинной жидкости. Оценка энергоэффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия может определяться по классической методике согласования энергетического баланса. Задача повышения энергоэффективности электротехнического комплекса с автономной системой электроснабжения сводится к обеспечению минимума затрат на топливо при сохранении текущих объемов добычи нефти. Предложены два вида моделей электротехнического комплекса: с индивидуальным источником электроэнергии и центром генерации на базе отдельных дизель-генераторов. Представлена методика расчета энергетических параметров элементов электротехнического комплекса с установками электроцентробежных насосов и скважинных штанговых насосов, при которой повышение энергоэффективности осуществляется за счет совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности путем снижения гармонических составляющих тока. Произведено моделирование электротехнического комплекса погружного электродвигателя с целью определения величин напряжения и тока при коммутационных процессах. Проведено моделирование автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия на потери напряжения и моделирование дизель-генераторов на отклонение частоты вырабатываемого напряжения при набросе и сбросе нагрузки.

**Ключевые слова:** нефтедобывающее предприятие, электротехнический комплекс, автономная система электроснабжения, энергоэффективность, согласование параметров.

**Для цитирования:** Городнов А.Г. Построение энергоэффективных электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4. С. 64-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-64-78.

## DESIGN OF ENERGY EFFICIENT ELECTROTECHNICAL COMPLEXES WITH AN AUTONOMOUS ELECTRIC SUPPLY SYSTEM

AG. Gorodnov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia  
gorodnov\_kai@mail.ru

**Abstract:** Improving energy efficiency and reducing the costs of creating an autonomous power supply complex for an oil production enterprise is an urgent problem and requires a rational solution. At each stage of the electrical complex development of the oil production enterprise,

*the purpose is to increase energy efficiency in order to reduce the unit cost of electricity per unit of produced well fluid volume. The electrical complex energy efficiency assessment of the oil production enterprise can be determined by the classical methodology of the energy balance. The task of increasing the energy efficiency of the electrical complex with an autonomous power supply system is to ensure a minimum of fuel costs while maintaining current oil production. Two types of the electrical complex models are proposed: with an individual electricity source and a generation center based on individual diesel generators. A method for calculating the energy parameters of the electrical complex components with installations of different types of pumps is presented. In this case, the energy efficiency is improved due to joint deep and group reactive power compensation and power factor correction by reducing the harmonic components of the current. The electrical complex simulation of a submersible electric motor has been carried out in order to determine the values of voltage and current during switching processes. The autonomous power supply system modeling of an oil production enterprise in case of voltage losses and the simulation of diesel generators with a frequency deviation of the generated voltage during load surges was carried out.*

**Keywords:** oil production enterprise, electrotechnical complex, autonomous power supply system, energy efficiency, parameters matching.

**For citation:** Gorodnov AG. Design of energy efficient electrotechnical complexes with an autonomous electric supply system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(4):64-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-64-78.

### **Введение**

Стоимость электроэнергии составляет примерно 50% от себестоимости добычи нефти. Более половины всей потребляемой электроэнергии приходится на установки скважинных насосов. Средний расход электроэнергии на одну тонну добываемой нефти составляет примерно 80-120 кВт·ч, что в переводе на удельные затраты топлива, потребляемого генераторными установками электротехнического комплекса автономной системы электроснабжения (АСЭС), в зависимости от их режима работы, составляет 20-30 л.

Нестабильность на рынке энергоресурсов, а именно: низкая цена на нефть и высокая её волатильность, сопровождающаяся ростом тарифов на электроэнергию, вынуждает нефтедобывающие предприятия искать способы снижения своих расходов за счёт повышения энергоэффективности и снижения затрат на создание электротехнического комплекса системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия, что имеет более выраженный характер в труднодоступных местах, где электроснабжение от централизованной системы проблематично.

Автономная система электроснабжения нефтедобывающих предприятий в качестве электрогенераторов использует газопоршневые либо дизель-генераторные установки. Удельный расход топлива генераторных установок сильно зависит от режима работы элементов электротехнического комплекса автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия, а также от показателей качества электроэнергии. Затраты на сооружение автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия зависят от протяженности линий электропередач, количества элементов сети (генераторов, трансформаторов, выключателей) и их номиналов. От конфигурации сети зависит надёжность электроснабжения электродвигателей скважинных насосов, а, следовательно, длительность простоев основного оборудования добывающих скважин, ведущая к недоотпуску нефти и уменьшению прибыли.

Таким образом, повышение энергоэффективности и снижение затрат на создание электротехнического комплекса автономного электроснабжения нефтедобывающего предприятия является актуальной проблемой и требует рационального решения.

На начальном этапе эксплуатации нефтяного месторождения нефть добывается фонтанирующим способом. Со временем давление в скважине падает и объем добываемой нефти снижается. Для того, чтобы объем извлекаемой нефти из скважины увеличить применяют механизированные способы добычи нефти. Одним из таких способов является технология *ESP (Electric Submersible Pump)* [1-3], которая заключается в том, что в скважину погружается центробежный насос, приводимый в движение погружным электрическим двигателем [4-6].

На отдаленных и труднодоступных для централизованного электроснабжения

месторождениях питание электродвигателей осуществляется от дизель-генераторных установок по схеме «один дизель-генератор – одна скважина», если установлены мощные (100–700 кВт) погружные электродвигатели [7-8]. Также применяется схема «один дизель-генератор – несколько скважин», где установлены погружные электродвигатели малой и средней мощности (50-100 кВт) [9]. Электротехнические комплексы (ЭТК), построенные по схеме питания основного электрооборудования скважин от одного дизель-генератора обозначим как ЭТК-1.

По мере освоения месторождения число скважин с дизель-генераторами и установками электроцентробежных насосов (УЭЦН) растет, а число фонтанирующих скважин уменьшается [10-11]. Для данного этапа характерны: низкий (менее 60%) коэффициент загрузки дизель-генераторов; высокие затраты на расход дизельного топлива и его доставку; затраты на расходные материалы и запасные части для дизель-генераторных установок и другие. Эти особенности вынуждают перейти ко второму этапу эксплуатации нефтяного месторождения, на котором осуществляется построение энергоэффективных электротехнических комплексов с автономным электроснабжением от групповых центров генерации (ЭТК-2), что позволяет уменьшить удельные затраты электроэнергии на единицу добываемой продукции [12]. Нефтяное месторождение при этом делится на зоны. В каждой зоне создается центр генерации, на котором устанавливаются группы дизель-генераторных установок, что приводит к сокращению их общего числа и увеличению коэффициента загрузки. От центра генерации по создаваемой линии электропередач осуществляется питание всех погружных электродвигателей на кустовых площадках данной зоны. При завершении строительства воздушных высоковольтных линий электропередачи централизованной системы электроснабжения эксплуатация нефтяного месторождения переходит на третий этап, на котором питание погружных электродвигателей по зонам переводится на централизованную систему электроснабжения. Понижительные трансформаторные подстанции централизованной системы электроснабжения устанавливаются на площадках центров генерации. Дизель-генераторные установки выводятся в режим резервного питания.

Таким образом, на каждом этапе развития электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия имеет место актуальная задача повышения энергоэффективности с целью сокращения удельных затрат электроэнергии на единицу объема добываемой скважинной жидкости

#### Материалы и методы

Оценка энергоэффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия может определяться по классической методике согласования энергетического баланса [13]. Коэффициент энергоэффективности как для ЭТК-1, так и для ЭТК-2 выражается формулой:

$$K_{\text{эф.ЭТК}} = 1 - \frac{\gamma_{\text{после}} P_{\text{послеЭТК}}}{\gamma_{\text{до}} P_{\text{доЭТК}}}$$

где  $K_{\text{эф.ЭТК}}$  – коэффициент энергоэффективности ЭТК;  $\gamma_{\text{до}}, \gamma_{\text{после}}$  – удельный расход топлива дизель-генераторной установки на единицу вырабатываемой активной мощности до и после мероприятий по совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности;  $P_{\text{доЭТК}}, P_{\text{послеЭТК}}$  – суммарные потери активной мощности до и после мероприятий по совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности ЭТК.

Суммарные потери активной мощности до и после мероприятий по совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности ЭТК-1:

$$P_{\text{доЭТК1}}^{\Sigma} = \Delta P_{\text{доЭТКООСj}} + P_{\text{эdj}} + \Delta P_{\text{эdj}}$$

$$P_{\text{послеЭТК1}}^{\Sigma} = \Delta P_{\text{послеЭТКООСj}} + P_{\text{эdj}} + \Delta P_{\text{эdj}}$$

$$\Delta P_{\text{доЭТКООСj}} = \Delta P_{\text{доСФ}} + \Delta P_{\text{доПЧ}} + \Delta P_{\text{доС-Ф}} + \Delta P_{\text{доТр}} + \Delta P_{\text{доКЛ}}$$

$$\Delta P_{\text{после ЭТКООС}j} = \Delta P_{\text{после СФ}} + \Delta P_{\text{после ПЧ}} + \Delta P_{\text{после С-Ф}} + \Delta P_{\text{после Тр}} + \Delta P_{\text{после КЛ}}$$

где  $\Delta P_{\text{до ЭТКООС}j}$ ,  $\Delta P_{\text{после ЭТКООС}j}$  – суммарная потребляемая мощность электротехническим комплексом основного оборудования скважины (ЭТК ООС) от генератора до и после мероприятий по совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности ЭТК;  $\Delta P_{\text{до СФ}}$ ,  $\Delta P_{\text{после СФ}}$  – потери мощности в сетевом фильтре до и после мероприятий;  $\Delta P_{\text{до ПЧ}}$ ,  $\Delta P_{\text{после ПЧ}}$  – потери мощности в преобразователе частоты до и после мероприятий;  $\Delta P_{\text{до С-Ф}}$ ,  $\Delta P_{\text{после С-Ф}}$  – потери мощности в синус-фильтре до и после мероприятий;  $\Delta P_{\text{до Тр}}$ ,  $\Delta P_{\text{после Тр}}$  – потери мощности в трансформаторе до и после мероприятий;  $\Delta P_{\text{до КЛ}}$ ,  $\Delta P_{\text{после КЛ}}$  – потери мощности в кабельной линии до и после мероприятий;  $\Delta P_{\text{эдж}}$  – потери активной мощности в электродвигателе;  $P_{\text{эдж}}$  – активная мощность электродвигателя.

Суммарная потребляемая активная мощность от автономного центра генерации до и после мероприятий по совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности:

$$P_{\text{до ЦГ}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^k P_i = \Delta P_{\text{до тр1}} + \Delta P_{\text{до ВЛ}} + \sum_{j=1}^N [\Delta P_{\text{до тр2}j} + \Delta P_{\text{до ЭТКООС}j} + P_{\text{эдж}} + \Delta P_{\text{эдж}}]$$

$$P_{\text{после ЦГ}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^k P_i = \Delta P_{\text{после тр1}} + \Delta P_{\text{после ВЛ}} + \sum_{j=1}^N [\Delta P_{\text{после тр2}j} + \Delta P_{\text{после ЭТКООС}j} + P_{\text{эдж}} + \Delta P_{\text{эдж}}]$$

где  $\Delta P_{\text{до тр1}}$ ,  $\Delta P_{\text{после тр1}}$  – потери мощности в повышающем трансформаторе центра генерации до и после мероприятий;  $\Delta P_{\text{до тр2}}$ ,  $\Delta P_{\text{после тр2}}$  – потери мощности в понижающем трансформаторе до и после мероприятий;  $\Delta P_{\text{до ВЛ}}$ ,  $\Delta P_{\text{после ВЛ}}$  – потери мощности в воздушных линиях электропередачи до и после мероприятий.

Задача повышения энергоэффективности ЭТК-1 с автономной системой электроснабжения сводится к обеспечению минимума затрат на топливо при сохранении текущих объемов добычи нефти. Этого можно добиться за счет повышения коэффициента полезного действия (КПД) кабельной линии электротехнического комплекса. Основным способом повышения КПД элементов электротехнического комплекса является снижение реактивной мощности, а, следовательно, и снижение полной мощности.

Для установившихся условий синусоидальности токов и напряжения, когда в цепи кроме основной гармонической составляющей присутствуют другие гармоники, активная мощность  $P$  и реактивная мощность  $Q$  принимают вид [14]:

$$P = 3 \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k$$

$$Q = 3 \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k$$

где  $k$  – номер гармоники.

Полная мощность основной гармоники  $A$  через эти мощности выражается:

$$A = \sqrt{P_A^2 + Q_A^2}$$

где  $P_A$  – активная мощность основной гармоники;  $Q_A$  – реактивная мощность основной гармоники.

Полная мощность в условиях длительного искажения синусоидальности формы тока и напряжения отличается от полной мощности основной гармоники, её можно представить в виде:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

где  $D$  – мощность искажений, которая учитывает искажения формы напряжения и тока.

Разность между квадратами полной мощности  $S$  и активной мощности  $P$  обозначают термином «неактивная мощность»:

$$N^2 = S^2 - P^2$$

На рис. 1 представлен ЭТК-1 с автономной системой электроснабжения основного оборудования добывающей скважины. На рис. 1 представлен преобразователь частоты, который, с одной стороны, позволяет осуществлять плавный пуск и регулировку скорости вращения погружного электродвигателя. С другой стороны, преобразователь частоты генерирует в сеть высшие гармонические составляющие, что приводит к снижению коэффициента мощности. Для подавления высших гармонических составляющих используют фильтрокомпенсирующие устройства (активные, пассивные и гибридные фильтры), тем самым повышая  $\cos\phi$ . Для понижающего трансформатора погружной электродвигатель представляет собой активно-индуктивную нагрузку, кроме того от понижающего трансформатора питается дополнительно линейная нагрузка (система обогрева, система кондиционирования, освещение, двигатели насосов внутрипромысловый парекачки), поэтому потребляемую реактивную мощность с помощью устройств глубинной компенсации и фильтра высших гармоник невозможно полностью скомпенсировать. В работах [11,12] предлагается более эффективный способ коррекции  $\cos\phi$ , который заключается в совместной компенсации реактивной мощности и подавлении гармонических составляющих за счет применения фильтров гармоник и конденсаторных батарей. Но при таком подходе КПД кабельной линии, питающей погружной электродвигатель, имеет низкое значение 0,75-0,85 (в зависимости от длины кабельной линии и мощности погружного электродвигателя). В данной работе предлагается увеличить КПД кабельной линии, питающей погружной электродвигатель, за счет применения глубинной компенсации реактивной мощности, которая заключается в непосредственном подключении конденсаторных батарей к питающим клеммам погружного электродвигателя (рис. 2).

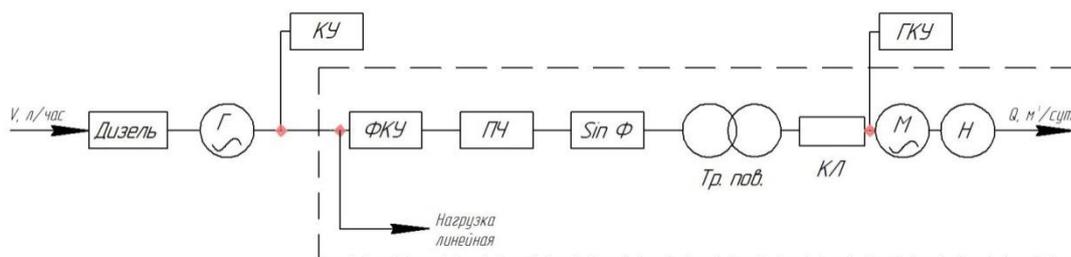


Рис. 1. Модель ЭТК-1 НДП с АСЭС

На рис. 1 и рис. 2 обозначены: ЭТК ООДС – электротехнический комплекс основного оборудования добывающей скважины; Г – генератор; Тр. пов. – повышающий трансформатор; Скв.1 – нефтяная скважина; ВЛ – воздушная линия электропередачи; Тр. пон. – понижающий трансформатор; ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство; ПЧ – преобразователь частоты; Sin Ф – синус-фильтр; КЛ – кабельная линия; М – погружной электродвигатель; КУ – компенсирующее устройство; ГКУ – глубинное компенсирующее устройство; Н – насос.

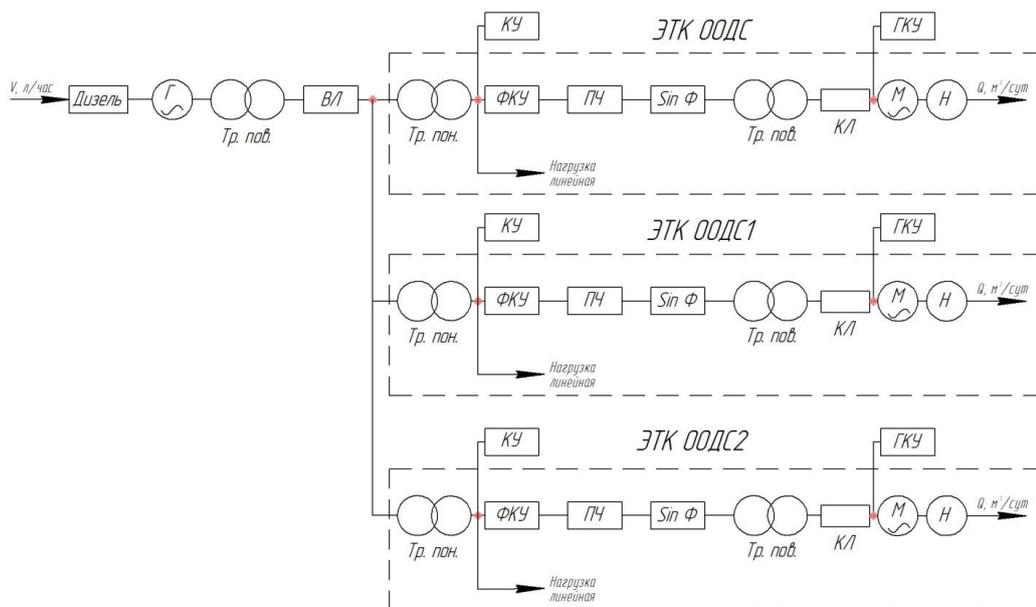


Рис. 2. Модель ЭТК-2 НДП с АСЭС

Глубинное компенсирующее устройство (ГКУ) – установка, предназначенная для компенсации ёмкостной составляющей переменного тока погружного электродвигателя внутри нефтяной скважины. Глубинное компенсирующее устройство является нерегулируемым устройством (конденсаторные батареи) и жестко присоединено к электродвигателю погружной насосной установки добычи нефти. Коррекция коэффициента мощности за счет совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности за счет снижения гармонических составляющих тока дает следующие положительные эффекты. Первый заключается в том, что снижается потребляемая полная мощность, что в конечном итоге ведет к уменьшению удельного расхода топлива дизель-генераторных установок. Второй эффект заключается в том, что с уменьшением реактивной мощности уменьшается полный ток, протекающий через элементы электротехнического комплекса. Это позволяет выбрать элементы и соединительные проводники электротехнического комплекса меньшего номинала.

Дизель-генераторные установки выбираются по полной мощности [15]. Удельный расход топлива дизель-генераторных установок зависит от загрузки дизель-генераторов активной мощностью. Чем больше дизель-генератор загружен по активной мощности, тем меньше удельный расход дизельного топлива на единицу вырабатываемой электроэнергии [16]. Снижение реактивной мощности позволяет выбрать меньшее число дизель-генераторных установок, тем самым увеличить их загрузку по активной мощности.

При выборе дизель-генераторной установки важным моментом является стабилизация частоты и напряжения в автономной электрической сети при набросе и сбросе нагрузки [17-19]. Существует максимальная величина наброса/сброса нагрузки при заданной величине базовой мощности при условии соблюдения стандарта ISO 8528-5, согласно которому для класса генераторов G1 допускается диапазон отклонения частоты +18/-25% (время восстановления частоты 10 с), а для класса генераторов G3 допускается диапазон +10/-15% (время восстановления частоты 3 с). Это означает, что при подключении (отключении) соответствующей максимальной нагрузки частота не выйдет за указанные пределы. Сертификация Grid Codes BDEW (German Association of Energy and Water Industries) более жесткая: она не допускает отклонения напряжения при набросе и сбросе нагрузки, тогда как по ISO 8528-5 для класса G3 допускаются отклонения напряжения в пределах +20/-15% в пределах 4 с.

Отечественные требования в отношении стабилизации частоты регламентируются согласно ГОСТ 32144-2013: отклонение частоты в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками, не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии, не должно превышать  $\pm 1$  Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и  $\pm 5$  Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю. Изменение частоты +10/-15% соответствует в абсолютных значениях +5/-7,5 Гц, что соответствует международным требованиям к

генераторам класса G3.

Расчет энергетических параметров элементов электротехнического комплекса с установками электроцентробежных насосов предлагается производить по следующей методике:

1. Выбор и расчет параметров конкретного погружного электродвигателя, исходя из характеристик центробежного насоса.
2. Выбор и расчет мощности компенсирующего устройства для индивидуальной глубинной компенсации реактивной мощности погружного электродвигателя (ПЭД).
3. Выбор и расчет параметров кабеля, питающего погружной электрический двигатель. Сечение кабеля выбирается исходя из экономической целесообразности (потребляемой мощности и мощности потерь) [20].
4. Выбор и расчет параметров синус-фильтра.
5. Выбор и расчет параметров повышающего трансформатора.
6. Выбор и расчет преобразователя частоты.
7. Выбор и расчет фильтрокомпенсирующего устройства.
8. Выбор и расчет мощности компенсирующего устройства, устанавливаемого на шинах 0,4 кВ понижающего трансформатора.
9. Выбор и расчет параметров понижающего трансформатора.
10. Построение системы электроснабжения нефтедобывающего комплекса, оптимальной по критерию минимума протяженности и числу центров генерации, в том числе выбором дизель-генераторов. Установленная полная мощность дизель-генераторов должна быть больше суммарной полной потребляемой мощности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия (включая потери мощности в элементах системы электроснабжения).
11. Проверка работоспособности спроектированной автономной системы электроснабжения электротехнических комплексов механизированной добычи нефти. Данная проверка осуществляется в программном комплексе *RTDS* и заключается в проверке системы электроснабжения на длительные допустимые токи в линиях и потери напряжения.

Расчет энергетических параметров электротехнического комплекса на основе штанговых скважинных насосных установок скважинных штанговых насосов (СШН) предлагается производить по следующей методике:

1. Определение коэффициента использования двигателей станков-качалок СШН в зависимости от длины хода штока и частоты качания.
2. Расчет средней активной мощности за сутки каждого двигателя станка-качалки СШН:

$$P_{\text{ср}} = k_u P_{\text{ном}}$$

3. Расчет средней реактивной мощности за сутки каждого двигателя станка-качалки СШН:

$$Q_{\text{ср}} = P_{\text{ном}} \operatorname{tg} \varphi k_u$$

4. Расчет суммарной средней активной мощности за сутки всех двигателей:

$$P_{\text{ср}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{\text{ср}i}$$

5. Расчет суммарной средней реактивной мощности за сутки всех двигателей:

$$Q_{\text{ср}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{ср}i}$$

6. рассчитывается средневзвешенный коэффициент использования:

$$k_{\text{и.ср}} = \frac{P_{\text{ср}}^{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{ном}i}}$$

7. Расчет максимальной активной мощности за сутки всех двигателей:

$$P_M = [1 + \frac{1,5}{\sqrt{n_3}} \sqrt{\frac{1 - k_{н.ср}}{k_{н.ср}}}] P_{ср}$$

8. Расчет максимальной реактивной мощности за сутки всех двигателей:

$$Q_M = 1.1 Q_{ср}$$

9. Выбор и расчет реактивной мощности компенсирующего устройства для групповой компенсации на шинах понижающего трансформатора.

10. Расчет полной мощности трансформаторной подстанции:

$$S_{max} = \sqrt{P_M^2 + (Q_M - Q_{кв})^2}$$

При использовании одностранформаторной подстанции  $S_{mp} \geq S_{max}$ . При двухтрансформаторной подстанции мощность одного трансформатора  $S_{mp} \geq \frac{S_{max}}{1,4}$ .

Далее выполняются пункты 10-11, как при согласовании энергетических параметров элементов электротехнического комплекса УЭЦН.

При создании ЭТК-2 для питания групп трансформаторных подстанций скважин в отдельных зонах нефтяного месторождения возникают следующие проблемы:

1. Определение числа центров генерации и координат привязки на местности.
2. Определение конфигурации линий электропередачи системы электроснабжения трансформаторных подстанций скважин от одного центра генерации.

Для решения этих проблем предложена методика проектирования ЭТК нефтедобывающего предприятия с АСЭС, оптимальной по критерию минимума протяженности линий электропередач и числу центров генерации.

Основные положения методики:

1. Формирование системы исходных данных: координаты кустовых площадок, мощность и коэффициенты использования генерирующего и основного электрооборудования, параметры электрических линий.
2. Определение минимальных расстояний между соседними скважинами с учетом ограничений (рельеф местности, сооружения) с помощью модифицированного алгоритма Ли.
3. Построение конфигурации системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия.
  - 3.1. Построение минимального остовного дерева графа, сумма весов ребер которого минимальна с помощью модифицированного алгоритма Прима.
  - 3.2. Определение местоположения центра генерации.
  - 3.3. Проверка участков электрической сети по величине длительно допустимых токов (если электрическая сеть не соответствует по проверяемому параметру, то зона делится на два участка и повторяются пункты 3.1-3.3).
4. Построение конфигурации линии электропередачи АСЭС участка по трем вариантам и выбор варианта с наименьшими затратами:
  - минимальное дерево графа с точками Ферми-Торичелли-Штейнера;
  - наикратчайший Гамильтонов цикл при одноцепной воздушной линии электропередачи;
  - наикратчайший Гамильтонов цикл при двухцепной воздушной линии электропередачи.

#### Результаты и обсуждение

Модели электротехнических комплексов ЭТК-1 и ЭТК-2 разработаны в среде RSCAD 5.0007.2 (рис. 3, рис. 4) для месторождения Южная Румайла скважины Ru-203, Ru-065, Ru-064, Ru-050, Ru-269, Ru-262.

Цель эксперимента – определение соответствия установленным требованиям значений напряжений, токов и частоты питающей сети электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения при набросе и сбросе нагрузки в зависимости от наличия или отсутствия глубинной компенсации реактивной мощности.

План эксперимента:

1. Получить значения напряжений и токов электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения в нормальном режиме работы.
2. Получить уровни отклонения частоты напряжения автономной системы

электропитания при набросе и сбросе нагрузки.

3. Получить уровни перенапряжений при пуске ПЭД от дизель-генератора при постоянной нагрузке на валу для двух режимов: первый режим – глубинная компенсация реактивной мощности отключена; второй режим – глубинная компенсация реактивной мощности подключена к клеммам питания ПЭД.

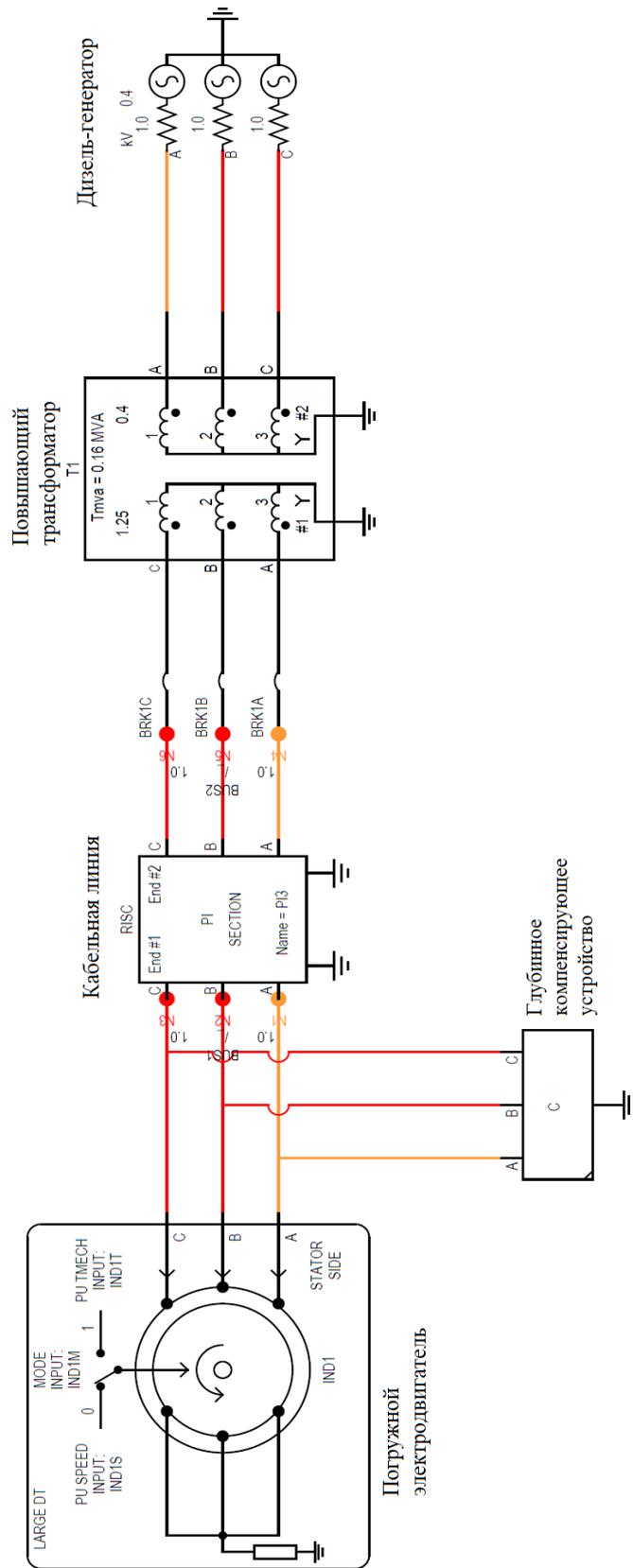


Рис. 3. Модель ЭТК-1 в среде RSCAD комплекса RTDS

Работа по моделированию в программной среде RSCAD условно разделена на этапы с последовательным получением модели электрической сети и выполнением проверки статической и динамической устойчивости. Этап 1:

- создание общих моделей источников электроэнергии на основе модели синхронного генератора (дизель-генераторная установка), первичного двигателя, системы автоматического регулирования тока возбуждения и стабилизатора напряжения генератора;
- подготовка схем управления выключателями в различных узлах сети;
- подготовка вспомогательных измерительных элементов для вывода вычисляемых программным обеспечением RSCAD параметров на мнемосхему для удобного считывания пользователем;
- первоначальная подготовка и отладка модели источника электроэнергии.

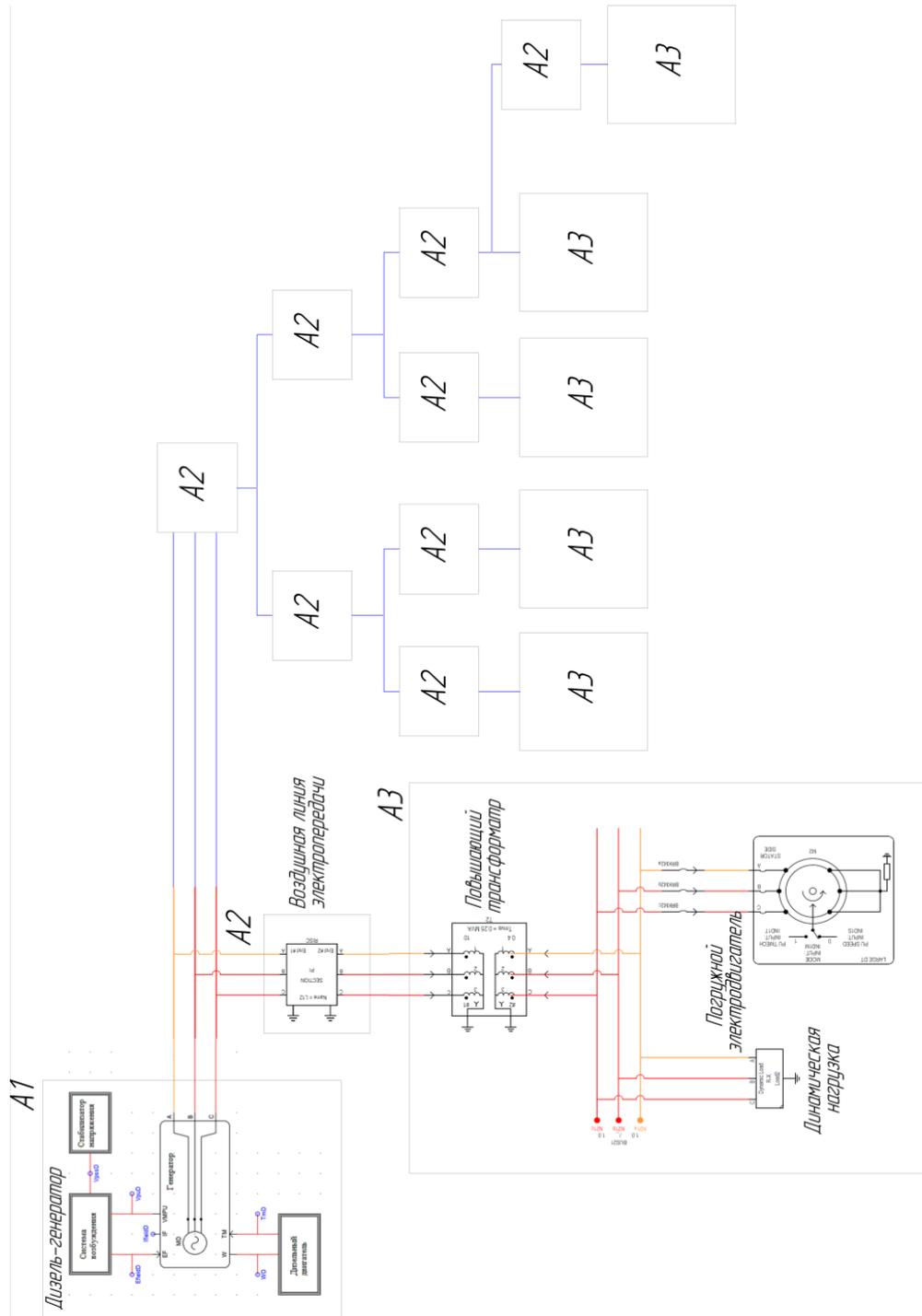


Рис. 4. Модель ЭТК-2

A1 – дизель-генератор; A2 – линия электропередачи; A3 - электротехнический комплекс основного оборудования добывающей скважины.

Этап 2:

- расчет и построение модели электрической сети;
- анализ работы сети и сохранение устойчивой работы.

Линии электропередачи представлены в виде блока «*PI Section Model*». Данный модуль моделирует собственные и взаимные сопротивления, индуктивности и емкости ( $R_p$  – активное сопротивление прямой последовательности,  $X_p$  – индуктивное сопротивление прямой последовательности,  $X_{cp}$  – емкостное сопротивление прямой последовательности,  $R_z$  – активное сопротивление нулевой последовательности,  $X_z$  – индуктивное сопротивление нулевой последовательности,  $X_{cz}$  – емкостное сопротивление нулевой последовательности).

Глубинное компенсирующее устройство для ЭТК-1 ( $Q = 60$  кВар) представлено в виде блока «*Dynamic Load*» с возможностью изменения параметров.

Линейная нагрузка для ЭТК-2 (номинальная мощность  $S_{max} = 40$ кВА; коэффициент мощности  $\cos\phi = 0,8$ ) также представлена в виде блока «*Dynamic Load*» с возможностью изменения параметров в процессе моделирования.

Погружной электродвигатель насоса представлен в виде асинхронного двигателя «*Induction machine*».

Технические характеристики погружного электродвигателя (ЭД-Я 90-117 М1В55):

Номинальное напряжение  $U_{д.ном} = 1040$  В;

Номинальная мощность на валу  $P_{д.ном} = 90$  кВт;

Номинальная частота вращения  $n_{ном} = 2910$  об/мин;

Номинальный КПД  $\eta_{ном} = 84,5\%$ ;

Номинальный коэффициент мощности  $\cos\phi_{д.ном} = 0,75$ ;

Номинальный ток  $I_{д.ном} = 50$  А;

Номинальный момент  $M_{д.ном} = 210$  Н·м;

Кратность пускового тока  $k_I = 5,0$ ;

Кратность пускового момента  $m_{II} = 1,5$ ;

Кратность максимального момента  $m_{max} = 2,3$ ;

Момент инерции  $J = 0,48$  кг·м<sup>2</sup>;

Номинальное скольжение  $s_{ном} = 3,0\%$

Трансформаторы представлены в виде блока «*Power Transformers*» со всеми соответствующими техническими характеристиками (номинальная мощность  $S_{тр} = 250$  кВА; напряжение на высокой стороне  $U_{вн} = 10$  кВ; напряжение на низкой стороне  $U_{нн} = 0,4$  кВ; потер холостого хода  $P_{хх} = 0,65$  кВт; потери короткого замыкания  $P_{кз} = 3,1$ кВт; ток холостого хода  $I_{хх} = 2,3\%$ ; напряжение короткого замыкания  $U_{кз} = 4.5\%$ ).

Модель синхронной машины в *RTDS* представляет собой трехфазную электрическую модель, которая может использоваться в качестве генератора (при положительном крутящем моменте), двигателя (при отрицательном крутящем моменте) или синхронного компенсатора (без крутящего момента). Для моделирования систем возбуждения использовались сформированные на *RTDS* модели генераторов.

В данной работе дизель-генератор моделируется как синхронный генератор с управляемой системой возбуждения, приводимый в движение дизельным двигателем с регулятором скорости (номинальная мощность  $S_{ном} = 1110$  кВА; номинальное напряжение  $U_{ном} = 0,4$  кВ).

В итоге, модель системы дизель генератора, исследуемая в данной работе, состоит из: двигателя и регулятора скорости, системы возбуждения, стабилизатора напряжения и синхронного генератора.

В результате моделирования в программном комплексе *RTDS* уровней напряжений систем электроснабжения погружных электродвигателей выявлено наибольшее падение напряжения 4,1% (9590 В), что соответствует норме 5%.

На рис. 5-6 представлены результаты моделирования частоты и напряжения в автономной электрической сети при набросе и сбросе нагрузки ЭТК-2. Диапазон отклонений частоты напряжения составляет от 47,66 Гц до 52,99 Гц, что соответствует норме  $\pm 10\%$ .

В результате моделирования уровней перенапряжения в зависимости от наличия или отсутствия глубинной компенсации реактивной мощности выявлено, что максимальное значение составляет 16%, что не превышает допустимых значений (30% от номинального значения).

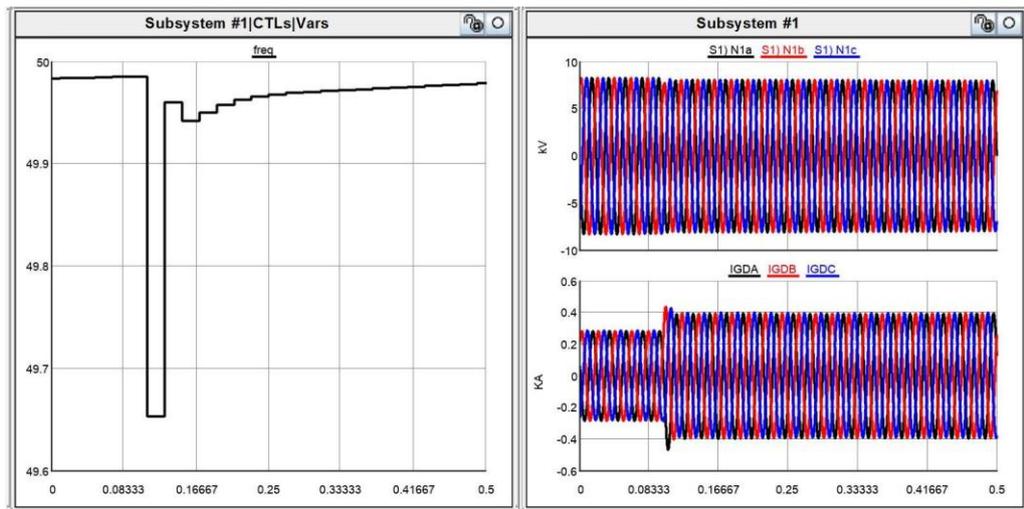


Рис. 5. Изменение частоты сети при увеличении нагрузки с 75% до 100% от номинальной загрузки дизель-генератора

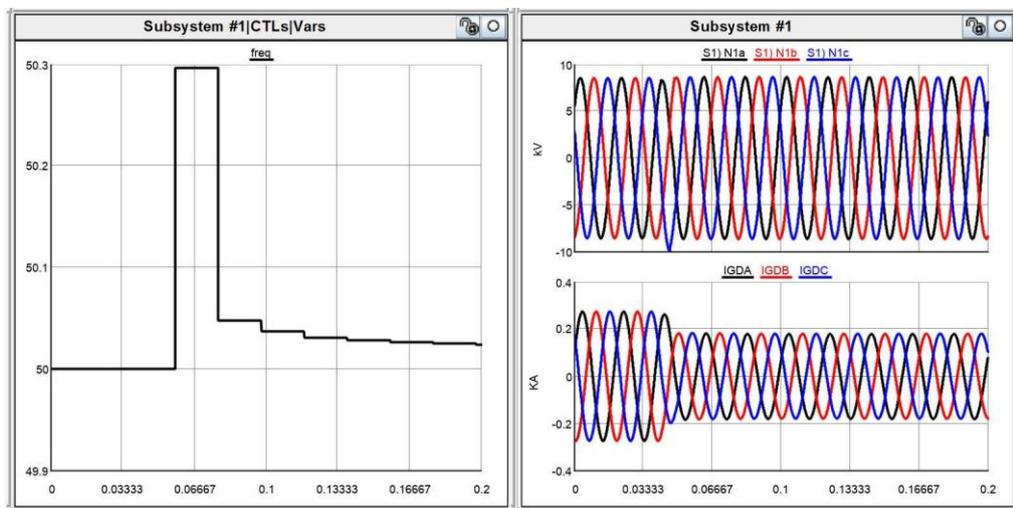


Рис. 6. Изменение частоты сети при снижении нагрузки с 75% до 50% от номинальной загрузки дизель-генератора

### Выводы

В данной работе были предложены два вида моделей электротехнического комплекса: с индивидуальным источником электроэнергии ЭТК-1 и центром генерации на базе отдельных дизель-генераторов ЭТК-2, была разработана методика расчета энергетических параметров элементов электротехнического комплекса автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия, на котором повышение энергоэффективности осуществляется за счет совместной глубокой и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности путем снижения гармонических составляющих тока, которые снижают удельный расход топлива, потребляемого дизель-генераторными установками на единицу добываемой нефти.

По данной методике было осуществлено построение энергоэффективного электротехнического комплекса автономного электроснабжения нефтедобывающего предприятия Южная Румайла. Сокращение удельного расхода электроэнергии на единицу добываемой нефти от внедрения результатов работы составляет 11%, экономия затрат на сооружение энергоэффективного электротехнического комплекса автономного электроснабжения нефтедобывающих предприятий составляет 14%.

В данной работе было произведено моделирование электротехнического комплекса погружного электродвигателя с целью определения величин напряжения и тока при коммутационных процессах. В результате уровень перенапряжений не превышает 16% при включении и 20% при отключении погружного электродвигателя,

что является допустимым.

Также было проведено моделирование полученной автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия на потери напряжения, при набросе и сбросе нагрузки. В результате уровень напряжения не превышает 5%.

Также проведено моделирование дизель-генераторов на отклонение частоты вырабатываемого напряжения при набросе и сбросе нагрузки. Диапазон отклонений частоты напряжения составляет от 47,66 Гц до 52,99 Гц при увеличении нагрузки с 75% до 100% от номинальной загрузки дизель-генератора и при снижении нагрузки с 75% до 50% от номинальной загрузки дизель-генератора, что соответствует нормам.

### Литература

1. Gabor Takacs. Electrical Submersible Pumps Manual. 1st Edition. Gulf Professional Publishing, 2009. 440 p.
2. Market research of sucker rod pump installations (USGGN). Analytical report [electronic resource]. Available at: URL: <http://research-techart.ru/report/walking-beam-pumping-unit.htm>. Accessed to : February 15, 2020.
3. Xiaodonz Liang, Ahmad El-Kadri. Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation // 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018.
4. Xiaodong Liang. Innovative design and feasibility study for a subsea electrical submersible pump system // 2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 May 2016.
5. Priyatmadi Sardjono, Muhammad Nur Wangsa Saputra. Optimal bottomhole pressure control on oil well production using PID-linear hybrid control on electric submersible pump // 2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 5-6 Oct. 2016.
6. Thorsen O.V., Dalva M. Combined electrical and mechanical model of electric submersible pumps // IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. V.37. Issue 2. Pp. 541-547.
7. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017.V.53. Issue 3. pp. 3164-3174.
8. Hussain A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 21-24 May 2017.
9. Miaoxin Jin, Pengmiao Zhang, Gang Li, Qiang Gao, Xiaolu Li, Dianguo Xu. A downhole multi-parameter monitoring system for electrical submersible pump // 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 June 2015.
10. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez. Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique // 2018 IEEE ANDESCON. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 22-24 Aug. 2018.
11. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov V.Yu., Gorodnov A.G Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting at Rumila field // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. Kazan: Kazan State Energy University. 2018. No. 11-12. pp. 127-132.
12. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov V.Yu., Gorodnov A.G Optimize the performance of electrical equipment in gas separation stations (degassing station DS) and electrical submersible pumps of oil equipment for oil Rumaila field // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS». Kazan: Kazan State Energy University. 2019 . No. 1-2. pp. 141-145.
13. Любимова Н.Г., Фомина В.Н. Особенности оценки эффективности энергосберегающих проектов, реализуемых у потребителей электроэнергии и тепла // Вестник университета. 2013. № 6. С. 150-156.
14. Коррекция коэффициента мощности и фильтрация гармоник в электроустановках // Серия инженера конструктора. АБВ. 2018. 58 с.
15. Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Автономная высокоэффективная электрогенерирующая электростанция // Тр. Нижегородского государственного технического университета. 2009. Т. 77, С. 68-72.
16. Оташехов Д.И. Дизель-генераторная установка. Диагностика. Ремонт. Техобслуживание.

М. : Издательский дом МЭИ, 2018. 760 с.

17. Bakhteev K., Fedotov A., Chernova N. et al. Methodological Approaches to the Choice of Energy Storage and Optimization of Their Parameters to Improve the Electric Power Quality in Various Types of Electric Power Systems // Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2019. Stará Lesná. Slovak Republic. 2019, pp. 488-493.

18. Bakhteev K., Fedotov A., Misbakhov R. The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages // Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019. pp. 347-352.

19. Bakhteev K., Fedotov A., Misbakhov R. The Improving quality of power supply to industrial consumers using highpower energy storage // 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga. 2018. pp. 1-5.

20. Ристхейн Э.М. Выбор сечений проводников по экономической плотности тока при автоматизированном проектировании электрических сетей // Труды. Таллинского политехнического института. 1983. № 563. С. 59-64.

### Автор публикации

**Городнов Антон Геннадьевич** – старший преподаватель кафедры «Электрооборудование», Казанский национальный исследовательский технологический университет им.А.Н. Туполева, г. Казань, Россия. Email:gorodnov\_kai@mail.ru.

### References

1. Gabor Takacs. *Electrical Submersible Pumps Manual*. 1st Edition. Gulf Professional Publishing, 2009. 440 p.

2. *Market research of sucker rod pump installations (USGGN)*. Analytical report [electronic resource]. Available at: URL: <http://research-techart.ru/report/walking-beam-pumping-unit.htm>. Accessed to: February 15, 2020.

3. Xiaodonz Liang, Ahmad El-Kadri. *Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation*. 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018. doi: 10.1109/EPEC.2018.8598331.

4. Xiaodong Liang. *Innovative design and feasibility study for a subsea electrical submersible pump system*. 2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 May 2016. doi: 10.1109/ICPS.2016.7490232.

5. Priyatmadi Sardjono, Muhammad Nur Wangsa Saputra. *Optimal bottomhole pressure control on oil well production using PID-linear hybrid control on electric submersible pump*. 2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 5-6 Oct. 2016. doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863229.

6. Thorsen O.V., Dalva M. *Combined electrical and mechanical model of electric submersible pumps*. IEEE Transactions on Industry Applications.2001;37(2):541-547

7. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities. IEEE Transactions on Industry Applications. 2017;53(3):3164-3174.

8. Hussain A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat. *A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system*. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 21-24 May 2017. doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.

9. Miaoxin Jin, Pengmiao Zhang, Gang Li, et al. *A downhole multi-parameter monitoring system for electrical submersible pump*. 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 June 2015. doi: 10.1109/ICPE.2015.7168111.

10. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez. *Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique*. 2018 IEEE ANDESCON. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 22-24 Aug. 2018. doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564581.

11. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov VYu, Gorodnov AG Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting at Rumila field. Proceedings of the higher educational institutions. *ENERGY SECTOR PROBLEMS*. Kazan: Kazan State Energy University. 2018;11-12:127-132.

12. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov VYu, Gorodnov AG. Optimize the performance of electrical equipment in gas separation stations (degassing station DS) and electrical submersible pumps of oil equipment for oil Rumaila field. Proceedings of the higher educational institutions. *ENERGY SECTOR PROBLEMS*. Kazan: Kazan State Energy University. 2019;1-2:141 - 145.
13. Lyubimova NG, Fomina VN. Features of evaluating the effectiveness of energy-saving projects implemented by consumers of electricity and heat. *University Bulletin*. 2013. No. 6. S. 150-156.
14. Power factor correction and harmonic filtering in electrical installations // Series of a design engineer. ABB. 2018.58 p.
15. Darienkov AB, Khvatov OS. Autonomous high-performance power generating power station. Nizhny Novgorod State Technical University. 2009;77:68-72.
16. Otashekhov DI. Diesel Generator Set. Diagnostics. Repairs. Maintenance. M.: Publishing House MPEI, 2018.760 p.
17. Bakhteev K, Fedotov A, Chernova N. et al. *Methodological Approaches to the Choice of Energy Storage and Optimization of Their Parameters to Improve the Electric Power Quality in Various Types of Electric Power Systems*. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2019. Stará Lesná. Slovak Republic. 2019. pp. 488-493.
18. Bakhteev K, Fedotov A, Misbakhov R. *The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages*. Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019. pp. 347-352.
19. Bakhteev K, Fedotov A, Misbakhov R. *The Improving quality of power supply to industrial consumers using highpower energy storage*. 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga. 2018. pp. 1-5. doi: 10.1109/RTUCON.2018.8659834.
20. Risthein EM. *The choice of sections of conductors for economic current density in the automated design of electrical*. Networks. Tallinn Polytechnic. 1983;563:59-64.

#### **Authors of the publication**

**Anton G. Gorodnov** – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. Email:gorodnov\_kai@mail.ru.

*Поступила в редакцию*

*16 марта 2020г.*



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО КАНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И.К. Насыров, В.В. Андреев

Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань.  
Россия  
nasyrovik@mail.ru

**Резюме:** В работе исследуются псевдослучайные сигналы нелинейных динамических систем, анализируется возможность их применения в информационных системах. Рассматриваются непрерывные и дискретные динамические системы: система Лоренца, отображения Бернулли и Энона. Поскольку параметры динамических систем входят в уравнения линейно, показана принципиальная возможность линейного управления состоянием нелинейной ДС.

Проводится сравнительный анализ корреляционных свойств сигналов этих динамических систем. Анализ корреляционных характеристик показал, что применение хаотических сигналов в системах связи и радиолокации позволяет значительно увеличить их разрешающую способность по дальности и, с учетом специфических свойств хаотических сигналов, позволяет обеспечить их скрытность.

Представление уравнений нелинейных динамических систем в виде стохастических дифференциальных уравнений позволило получить выражение для функционала правдоподобия, с помощью которого решаются многие задачи оптимального приема сигналов. Показано, что основным этапом при обработке принятого сообщения, обеспечивающий максимум функционалов правдоподобия состоит в вычислении корреляционных интегралов между компонентами и рассматриваемых систем. Это позволило положить в основу алгоритма обнаружения корреляционный прием между компонентами сигналов. Синтезирован корреляционный приемник обнаружения и найдены рабочие характеристики приемника.

**Ключевые слова:** псевдослучайные сигналы, нелинейные динамические системы, система Лоренца, отображения Энона, Бернулли, функционал правдоподобия, корреляционные функции; системы связи, корреляционный приемник, рабочие характеристики.

**Для цитирования:** И.К. Насыров, В.В. Андреев. Моделирование информационного канала с использованием хаотических сигналов нелинейных динамических систем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. № 4.С. 79-87. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-79-87.

## MODELING OF INFORMATION CHANNEL BY USING OF PSEUDORANDOM SIGNALS OF NONLINEAR DYNAMICAL SYSTEMS

IK. Nasyrov, VV. Andreev

Kazan Power Engineering University, Kazan, Russia  
nasyrovik@mail.ru

**Abstract:** Pseudorandom signals of nonlinear dynamical systems are studied and the possibility of their application in information systems analyzed. Continuous and discrete dynamical systems are considered: Lorenz System, Bernoulli and Henon maps. Since the parameters of dynamical systems (DS) are included in the equations linearly, the principal possibility of the state linear control of a nonlinear DS is shown.

The correlation properties comparative analysis of these DSs signals is carried out. Analysis of correlation characteristics has shown that the use of chaotic signals in communication and radar systems can significantly increase their resolution over the range and taking into account the specific properties of chaotic signals, it allows them to be hidden.

*The representation of nonlinear dynamical systems equations in the form of stochastic differential equations allowed us to obtain an expression for the likelihood functional, with the help of which many problems of optimal signal reception are solved. It is shown that the main step in processing the received message, which provides the maximum likelihood functionals, is to calculate the correlation integrals between the components and the systems under consideration. This made it possible to base the detection algorithm on the correlation reception between signal components. A correlation detection receiver was synthesized and the operating characteristics of the receiver were found.*

**Keywords:** *pseudorandom signals, nonlinear dynamical systems, optimal receiver, stochastic differential equations, Lorenz system, Henon's map, correlation functions.*

**For citation:** Nasyrov IK, Andreev VV. Modeling of information channel by using of pseudorandom signals of nonlinear dynamical system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(4):79-87. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-79-87.

### **Введение**

Шумоподобные сигналы (ШПС) в настоящее время получили применение в различных информационных системах [1], в том числе в системах широкополосной связи и передачи информации, так как обеспечивают высокую помехозащищенность информационных систем, обеспечивают совместимость передачи информации с измерением параметров движения объекта в системах подвижной связи [2-4].

В последние годы особое внимание исследователей в области информационных процессов и реальных систем различной физической природы, включая радиофизические и биологические системы, привлекают свойства динамического хаоса и связанные с ним бифуркационные явления [5-6].

В работах [7-9] обсуждаются общие принципы организации передачи информации с использованием специфических свойств динамического хаоса как колебаний, генерируемых нелинейными динамическими системами. Хаотические колебания используются в качестве сверхширокополосного аналогового шумоподобного сигнала. Динамическая природа этих колебаний используется при создании источника хаоса с заданными спектральными характеристиками и при формировании хаотических радиоимпульсов.

Хаотические колебания характеризуются различными статистическими свойствами и различной степенью чувствительности к воздействию шума. В работе [10] представлен обзор результатов по статистическому описанию динамического хаоса и влиянию шума на хаотические режимы колебаний.

Отличительными особенностями хаотических процессов [11,12], обеспечивающих применение динамического хаоса для передачи информации являются следующие:

- хаотические сигналы непериодичны и обладают непрерывным спектром, занимающим весьма широкую полосу, причем видом спектральной характеристики можно управлять.
- они имеют сложную структуру, нерегулярны и весьма чувствительны к изменению начальных условий, что позволяет генерировать сигналы сложной формы и непредсказуемого поведения.
- автокорреляционная функция этих сигналов обычно весьма быстро затухает, что позволяет считать сигналы от нескольких генераторов некоррелированными и ортогональными: это свойство позволяет применять хаотические сигналы в многопользовательских системах связи.

Особенностью хаотических сигналов нелинейных ДС является то, изменяя параметры и начальные условия, можно управлять видом и качеством генерируемого апериодического шумового сигнала, управлять такими его характеристиками, как спектр, распределение вероятностей, вид автокорреляционной (далее АКФ) и взаимно корреляционной функции (далее ВКФ).

В рамках настоящей работы рассматриваются следующие непрерывные и дискретные динамические системы: система Лоренца, отображения Бернулли и Энона. Проводится сравнительный анализ корреляционных свойств сигналов сформированного на основе этих динамических систем, представление уравнений нелинейных динамических систем в виде стохастических дифференциальных уравнений позволило получить выражение

для функционала правдоподобия, с помощью которого можно решать многие задачи оптимального приема сигналов. На основе взаимно корреляционных функций  $XU$ -компонент системы Лоренца и отображения Энона рассмотрен корреляционный приемник обнаружения и найдены рабочие характеристики приемника.

**Анализ корреляционных свойств хаотических сигналов**

При визуальном, спектральном и корреляционном анализе хаотический сигнал не отличим от белого шума. Огибающая автокорреляционной функции шумоподобных сигналов имеет один основной лепесток (выброс), длительность которого обратно пропорциональна ширине спектра сигнала. Представляет интерес провести сравнительный анализ корреляционных характеристик сигналов нелинейных ДС, наиболее часто используемых в информационных технологиях. Свойства АКФ и ВКФ рассмотрим на примере ДС Лоренца, отображения Энона и сдвига Бернулли.

Система Лоренца имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \sigma(Y - X), \\ \dot{Y} &= rX - Y - XZ, \\ \dot{Z} &= -bZ + XY, \end{aligned} \tag{1}$$

отображение Энона имеет вид:

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= Y_n + 1 - aX_n^2, \\ Y_{n+1} &= bX_n, \end{aligned} \tag{2}$$

сдвиг Бернулли имеет вид:

$$X_{n+1} = 2X_n \text{ mod } 1, \tag{3}$$

где  $X, Y, Z$  – фазовые переменные систем; параметры  $r, \sigma$  и  $b$  образуют вектор параметров  $\lambda_L(r, \sigma, b)$  системы Лоренца,  $a, b$  – компоненты вектора параметров  $\lambda_H(a, b)$  отображения Энона; точка над переменной означает дифференцирование по времени,  $n$  – номер итерации (дискретное время),  $2X \text{ mod } 1$  – означает взятие дробной части от числа  $X$ .

Следует отметить, что параметры в системе уравнений Лоренца, отображения Энона и сдвига Бернулли входят в уравнения линейно, и, таким образом, открывается принципиальная возможность линейного управления состоянием нелинейной ДС.

На Рис. 1 и 2 приведены графики изменения координат со временем системы Лоренца и от номера итерации  $N$  отображения Энона.

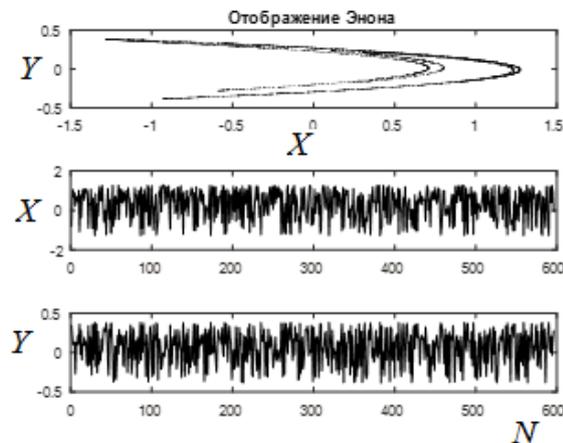


Рис. 1. Отображение Энона и зависимость координат  $X$  и  $Y$  от номера итерации  $N$

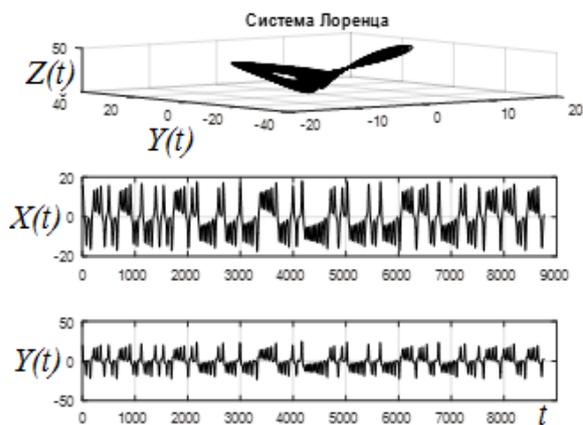


Рис. 2. Система Лоренца и зависимость координат  $X$  и  $Y$  от времени  $t$

На Рис.3 показаны графики автокорреляционных функций  $R_x$  системы Лоренца, отображения Энона и сдвига Бернулли. Параметры системы Лоренца:  $\sigma = 10$ ,  $r = 28$ ,  $b = 8/3$ . Параметры отображения Энона:  $a = 1,4$ ,  $b = 0,3$ .

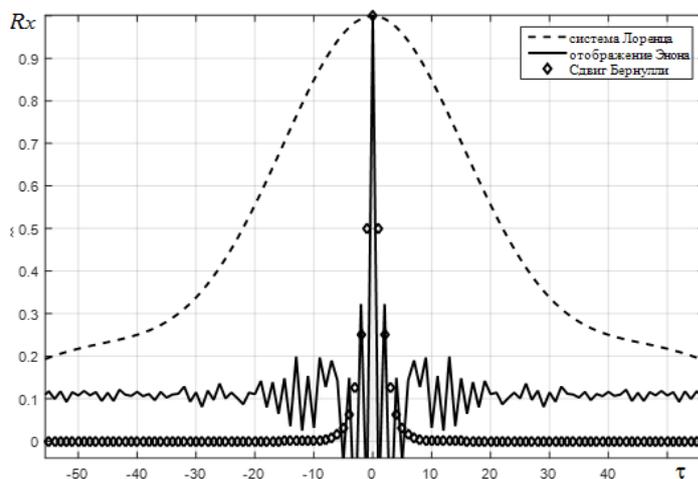


Рис. 3. Автокорреляционные функции  $X$ -компонент системы Лоренца, отображения Энона и сдвига Бернулли

Чем уже АКФ, более высокую разрешающую способность по дальности можно обеспечить при использовании хаотических радиоимпульсов в РЛС. Анализ автокорреляционных функции системы Лоренца, отображения Энона и сдвига Бернулли показывает, что рассматриваемые ДС с различной степенью приближения моделируют характеристики белого шума. Таким образом, применение хаотических сигналов в системах связи и радиолокации позволяет значительно увеличить их разрешающую способность по дальности и с учетом специфических свойств хаотических сигналов позволит обеспечить их скрытность.

#### Функционал правдоподобия

Важной задачей является выбор способа оптимального приема псевдослучайных сигналов, генерируемых нелинейными ДС. Для обнаружения полезного сигнала на фоне помех используют метод максимального правдоподобия. Предполагая априорно известными некоторые характеристики передаваемого полезного сигнала, канала и помех, а также их функциональное взаимодействие, нужно получить оптимальное приемное или решающее устройство, которое наилучшим образом воспроизводило переданное сообщение или принимало решение с наименьшими ошибками. Оптимальный приемник обнаружения должен вычислять апостериорное распределение вероятностей реализации принимаемого колебания. Вычисление сводится к вычислению отношения правдоподобия, которое производится взаимно корреляционным устройством.

В предыдущих работах авторов [13-17] представление уравнений нелинейных динамических систем в виде стохастических дифференциальных уравнений позволило

получить выражение для функционала правдоподобия, с помощью которого можно решать многие задачи оптимального приема сигналов.

Выражение для функционала правдоподобия получено в виде:

$$L(X, \lambda) = c \exp \left\{ -\frac{1}{N} \int_{t-\tau}^t \left[ \sum_{m=1}^k \Gamma_m^2(X, \lambda) \right] dt \right\}, \quad (4)$$

Где  $\Gamma(X, \lambda)$  – измеряемые реализации случайного поля когда на ДС воздействует случайная помеха  $\Sigma(t)$  вектор-столбец аддитивных шумов;  $\lambda(\lambda_X, \lambda_Y, \lambda_Z)$  – вектор параметров системы, значение индекса  $k$  определяется числом компонент ДС, для системы Лоренца  $k = 3$ ,  $c$  – коэффициент нормировки. Векторная форма выражений (1) и (2) имеет вид:

$$\Gamma(X, \lambda) = \dot{X} - F(X, \lambda) \quad (5)$$

где  $F(X, \lambda)$  – функция, описывающая правые части систем (1) и (2).

Для системы Лоренца:

$$\begin{aligned} F_X &= \sigma(Y - X) \\ F_Y &= rX - Y - XZ, \\ F_Z &= -bZ + XY \end{aligned} \quad (6)$$

Для отображения Энона:

$$\begin{aligned} F_{X_{n+1}} &= Y_n + 1 - aX_n^2, \\ F_{Y_{n+1}} &= bX_n. \end{aligned} \quad (7)$$

На основании выражений (5-7), функционал правдоподобия (4) для системы Лоренца запишем в виде

$$\begin{aligned} L_L(X, \lambda) &= \\ &= k_L \exp \left\{ -\frac{1}{N} \int_{t-\tau}^t \left[ (\dot{X} + \sigma X - \sigma Y)^2 + (\dot{Y} - rX + Y + XZ)^2 + (\dot{Z} + bZ - XY)^2 \right] dt \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

Пользуясь данными работ [10-13] для дискретного случая, функционал правдоподобия отображения Энона запишется в виде:

$$L_H(X, \lambda) = k_H \exp \left\{ -\frac{1}{N} \sum_{s=1}^m [(X_{s+1} - Y_s - 1 + aX_s^2)^2 + (Y_{s+1} - bX_s)^2] \right\} \quad (9)$$

Таким образом, основной этап при обработке принятого сообщения, обеспечивающий максимум функционалов  $L_L(X, \lambda)$  и  $L_H(X, \lambda)$  состоит в вычислении корреляционных интегралов между компонентами  $X(t)$  и  $Y(t)$  рассматриваемых систем. Это позволяет заключить, что в основу алгоритма обнаружения может быть положен корреляционный прием между  $X$  и  $Y$  компонентами сигналов.

#### Корреляционный приемник

Как уже упоминалось выше, оптимальный приемник обнаружения должен вычислять отношение правдоподобия, которое производится взаимно корреляционным устройством. В данном случае взаимно корреляционное устройство, вычисляет функцию:

$$R_{XY}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\tau)Y(t - \tau)dt \quad (10)$$

Структура приемника включает высокочастотные фильтры, согласованные со спектром принимаемого сигнала, перемножитель, интегратор и задерживающее устройство на время  $\tau$ , а на выходе приемника установлена ключевая схема, которая фиксирует момент взятия отчета, совпадающего с моментом окончания сигнала.

На Рис. 4 приведены графики ВКФ для  $XY$ -компонент системы Лоренца и отображения Энона.

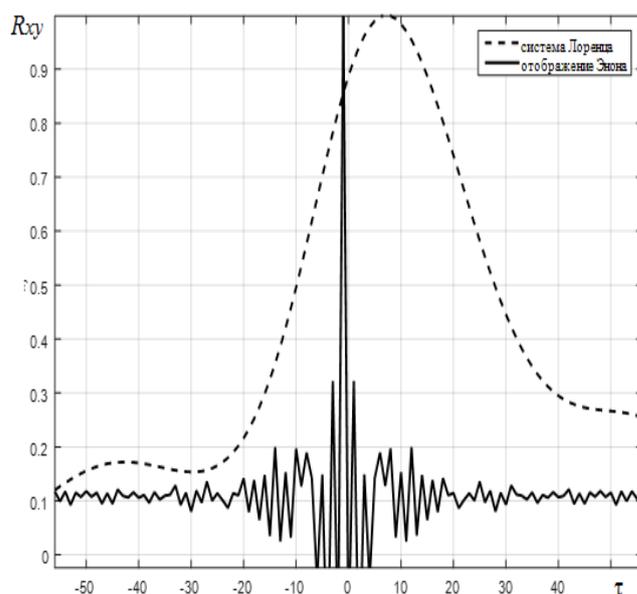


Рис. 4. Взаимно корреляционные функции XY-компонент системы Лоренца и отображения Энона

Цифровой вариант построения корреляционного приемника имеет ряд преимуществ по сравнению с аналоговым, в связи с возможностью быстрой смены параметров рабочего сигнала, а также возможностью длительного накопления сигнала, что особенно важно при приеме слабых сигналов.

**Рабочие характеристики приемника информационного сигнала**

На выходе системы обнаружения наблюдается случайный процесс, который сравнивается с порогом. Предполагаем, что хаотический сигнал и шумовая помеха являются широкополосными случайными процессами с гауссовским распределением вероятностей. Для построения характеристик обнаружения, зависимости вероятности ложной тревоги  $F$  и вероятности правильного обнаружения  $D$  от отношения сигнал/шум  $q$ , воспользуемся известными соотношениями [17]. Вычисления при заданных предположениях приводят к выражению

$$D = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \Phi \left[ \frac{R_{XY} \sqrt{\frac{q}{2\rho} - \Phi^{-1}(1 - 2F)}}{\sqrt{q + qR_{XY} + 1}} \right] \right\} \quad (11)$$

Величина  $r_{XY}$  – коэффициент взаимной корреляции  $X, Y$  компонент сигнала, параметр  $\rho$  определяется выражением

$$\rho = \frac{1}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) r^2(\tau) d\tau \cong \Delta FT, \quad (12)$$

И вычислен при условии равенства коэффициентов автокорреляции  $X$  и  $Y$  компонент сигнала и помехи  $\xi$ .

$$r_X(\tau) = r_Y(\tau) = r_\xi(\tau) = r(\tau) = \exp(-2\Delta F |\tau|) \cos(2\pi f_0 \tau) \quad (13)$$

где  $\Delta F$  – эффективная ширина частотной полосы;  $f_0 = 1/T$  центральная частота спектра,  $T$  – длительность сигнала. Предполагается, что выполняется условие широкополосности:  $\Delta FT \gg 1$  и  $\Delta F \ll f_0$ .

Величина  $q$  определяет отношение сигнал/шум:

$$q = \frac{M(X^2)}{M(N^2)} \quad (14)$$

На Рис.5 представлены характеристики обнаружения, соответствующие рассмотренному случаю и построенные при различных значениях параметров  $\Delta FT$ ,  $R_{XY}$  и вероятности ложных тревог  $F$ .

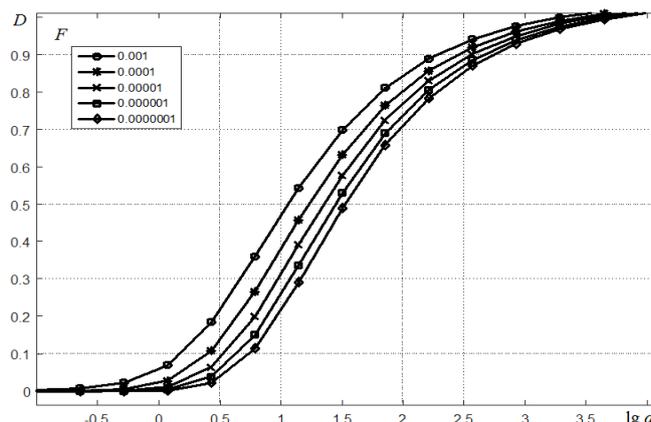


Рис. 5. Характеристики обнаружения при  $\rho = 100$ ,  $R_{XY} = 1.0$ .

### Заключение

На примере динамической системы Лоренца и отображений Энона и Бернулли, проведено моделирование информационного канала с использованием хаотических сигналов нелинейных динамических систем. Представление системы нелинейных динамических уравнений как стохастических дифференциальных уравнений позволило сконструировать функционал правдоподобия рассмотренных ДС. Проанализированы корреляционные функции сигналов нелинейных ДС и показано, что автокорреляционные функции имеют вид, подобный автокорреляционной функции стационарного белого шума.

На основе метода максимального правдоподобия предложен алгоритма обнаружения хаотических широкополосных сигналов, в основу которого положен корреляционный прием между компонентами сигнала рассчитаны характеристики обнаружения.

### Литература

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384с.
2. Дмитриев Ю.А., Кузьмин Л.В. Прием хаотических сигналов с использованием опорного генератора хаоса // Радиоэлектроника 2012. № 1.
3. Dmitriev A.S., Emel'yanov R.Yu., Lazarev V.A., et al. Simulation of Dynamics of the Neural Ensemble in the Active Wireless Network. J. Communication Technology and Electronics. 2017. V. 62. №10. pp. 1148-1151.
4. Губанов Д. и др. Генераторы хаоса в интегральном исполнении [Электронный ресурс]. Доступно по: URL: [http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99\\_08/stat\\_9.htm](http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99_08/stat_9.htm). Ссылка активна на: 10 октября 2019.
5. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А. «Коллективная передача информации сверхширокополосным прямо хаотическим ансамблем». Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. №2 (24). С. 80-89.
6. Дмитриев А.С., Герасимов М.Ю., Ицков В.В., Лазарев В.А., Попов М.Г., Рыжов А.И. «Активные беспроводные сверхширокополосные сети на основе хаотических радиоимпульсов». Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. №4. С. 354-363.
7. Афанасьев В.В., Логинов С.С. Новый класс цифровых радиоэлектронных динамических систем // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. Доступно по: URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3777](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3777)
8. Гавришев А.А., Жук А.П. Моделирование устройства имитации защиты контролируемых объектов с новым набором хаотических сигналов // Прикладная информатика. 2017. Т.12. № 4 (70). С. 122-132
9. Колесов В.В., Полубехин А. И., Чигин Е.П., и др. Применение дискретных хаотических алгоритмов в широкополосных телекоммуникационных системах // Вестник СибГУТИ. 2016. №3. С. 77-92.
10. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Окрокверцхов Г.А, и др. Статистические свойства динамического хаоса // УФН. 2005. Т. 175. № 2. С. 163-179.

11. Когай Г.Д., Тен Т.Л. Методы и модели хаотических процессов в системах связи // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 10. С. 61-64.
12. Кучеренко И.А. Применение сверхширокополосных сигналов с линейной частотной модуляцией в заградной радиолокации // Инженерный вестник Дона. 2016. №1. Доступно по: URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3545.
13. Васюта К.С., Мальшев А.А., Зоц Ф.Ф. Анализ корреляционных свойств хаотических радиопульсов // Системи обробки інформації. 2012. Т. 2. Випуск 3. С. 22-25.
14. Насыров И.К., Андреев В.В. Оптимальная оценка параметров псевдослучайных сигналов нелинейных динамических систем // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017. № 1. С. 29-35.
15. Насыров И.К., Андреев В.В. International Scientific Conference. «2018 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems». WECONF 2018 (IEEE Conference #№ 45890) 26-30 November 2018. St. Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation (SUAI).
16. Nasyrov I.K., Andreev V.V. Optimal Estimation of Parameters of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems // Russian Aeronautics. 2018. V. 61. №. 4. pp. 692-696,
17. Nasyrov I.K., Andreev V.V. About Optimal Reception of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems // Russian Aeronautics. 2019. V. 62. №. 2. pp. 326-330.

### Авторы публикации

**Насыров Ильгиз Кутдусович** – д-р.техн. наук, профессор кафедры «Инженерная кибернетика», Казанский государственный энергетический университет. Email: nasyrpvik@mail.ru.

**Андреев Владимир Васильевич** – канд. физ-мат.наук, доцент кафедры «Инженерная кибернетика», Казанский государственный энергетический университет. Email: vandreev46@mail.ru.

### References

1. Tikhonov VI. *Optimal'nyi priem signalov*. M.: Radio i svyaz', 1983. 320 s.
2. Varakin LE. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami*. M.: Radio i svyaz', 1985. 384s.
3. Dmitriev YuA, Kuz'min LV. Priem khaoticheskikh signalov s ispol'zovaniem opornogo generatora khaosa. *Radioelektronika* 2012. № 1.
4. Anishchenko VS, Vadivasova TE, Okrokvvertskhov GA, et al. *Statisticheskie svoystva dinamicheskogo khaosa*. *UFN*. 2005;175(2):163-179.
5. Kogai GD, Ten TL. Metody i modeli khaoticheskikh protsessov v sistemakh svyazi. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2014;10:61-64.
6. Afanas'ev VV, Loginov SS. Novyi klass tsifrovyykh radioelektronnykh dinamicheskikh system. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2016. № 4. Available at: URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3777.
7. Kucherenko IA. Primenenie sverkhshirokopolosnykh signalov s lineinoi chastotnoi modulyatsiei v zapregradnoi radiolokatsii. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2016. № 1. Available at: URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3545.
8. Gubanov D. Generatory khaosa v integral'nom ispolnenii Available at: URL:http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99\_08/stat\_9.htm Accessed to: 10 Oct 2019.
9. Vasyuta KS, Malyshev AA, Zots FF. Analiz korrelyatsionnykh svoystv khaoticheskikh radioimpul'sov. *Sistemi obrobki informatsii*. 2012;2(3):22-25.
10. Nasyrov IK, Andreev VV. Optimal'naya otsenka parametrov psevdosluchainykh signalov nelineinykh dinamicheskikh sistem. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017;1:29-35.
11. Nasyrov IK, Andreev VV. International Scientific Conference. «2018 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems». WECONF 2018 (IEEE Conference #№ 45890) 26-30 November 2018. St. Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation (SUAI).
12. Nasyrov IK, Andreev VV. Optimal Estimation of Parameters of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems. *Russian Aeronautics*. 2018;61(4):692-696.
13. Nasyrov IK, Andreev VV. About Optimal Reception of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems. *Russian Aeronautics*. 2019;62(2):326-330.
14. Nasyrov IK, Andreev VV. Optimal'naya ozenka parametrov psevdosluchainykh signalov nelineinykh dinamicheskikh sistem. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017;1:29-35.

© И.К. Насыров, В.В. Андреев

15. Nasyrov IK, Andreev VV. *International Scientific Conference. 2018 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems*. WECNF 2018 (IEEE Conference #№ 45890) 26-30 November 2018. St. Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation (SUAI).

16. Nasyrov IK, Andreev VV. Optimal Estimation of Parameters of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems. *Russian Aeronautics*. 2018;61(4):692-696.

17. Nasyrov IK, Andreev VV. About Optimal Reception of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems. *Russian Aeronautics*. 2019;62(2):326-330.

#### **Authors of the publication**

***Il'giz K. Nasyrov*** – Kazan Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: nasyrovik@mail.ru.

***Vladimir V. Andreev*** – Kazan Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: vandreev46@mail.ru.

***Поступила в редакцию***

***16 марта 2020г.***



## УПРАВЛЯЮЩАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов, А.Р. Сафин, А.Г. Логачева, Т.И. Петров,  
Н.Е. Кувшинов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
tsvetkov9@mail.ru

**Резюме:** Современные тенденции развития технологий основаны на необходимости проведения экспериментальных исследований разрабатываемого оборудования в лабораторных условиях с максимальным приближением режимов работы к реальным. Такие исследования невозможны без разработки специализированных стендов с системами автоматизации процессов испытаний.

Автоматизация процессов подразумевает организацию в составе стенда измерительных каналов с применением устройств аналогово-цифрового преобразования (АЦП), цифро-аналогового преобразования (ЦАП), цифро-цифрового преобразования (ЦЦП) и разработку аппаратно-программного комплекса (АПК) на основе быстродействующих вычислительных устройств.

В рамках проекта по созданию нового высокотехнологического оборудования специалистами ФГБОУ ВО «КГЭУ» и АО «ЧЭАЗ» разработан и создан экспериментальный стенд, предназначенный для проверки и подтверждения правильности выбранных конструктивно-схемных решений, примененных при конструировании синхронного вентильного электродвигателя (СВЭД) и станции управления штанговой скважинной насосной установкой (СУ ШСНУ).

Объектом экспериментальных исследований являлись макетные и опытные образцы электроприводов станков-качалок нефти, а также их составные части: СВЭД и СУ ШСНУ.

В статье рассматриваются способы организации измерительных и управляющих каналов измерительно-информационной системы экспериментального стенда, позволяющего проводить исследования образцов синхронных вентильных электродвигателей и станций управления штанговой скважинной насосной установкой в режимах, максимально приближенных к реальным полевым условиям с имитацией работы станка-качалки нефти штанговой скважинной насосной установки.

**Ключевые слова:** аналогово-цифровой преобразователь, аппаратно-программный комплекс, канал измерения, канал управления, датчик, стенд.

**Благодарности:** Публикация статьи осуществлена в рамках проекта «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений», Соглашение №074-11-2018-020 с Минобрнауки РФ от 30 мая 2018 г.

**Для цитирования:** Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., Логачева А.Г., Петров Т.И., Кувшинов Н.Е. Управляющая измерительно-информационная система экспериментального стенда // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4. С. 88-98. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-88-98.

## CONTROL MEASURING AND INFORMATION SYSTEM OF THE EXPERIMENTAL STAND

AN. Tsvetkov, VYu. Kornilov, AR. Safin, AG. Logacheva, TI. Petrov,  
NE. Kuvshinov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
tsvetkov9@mail.ru

**Abstract:** Modern trends in the development of technology are based on the need for experimental studies of the equipment being developed in laboratory conditions with the maximum approximation of the operating modes to real ones. Such studies are impossible without the development of specialized stands with test automation systems.

Automation of processes involves the organization of measuring channels as part of a stand using analog-to-digital conversion (ADC), digital-to-analog conversion (DAC), digital-to-digital conversion (DDC) and the development of a hardware-software complex (HSC) based on high-speed computing devices.

As part of the project to create new high-tech equipment, the specialists of FSBEI HE "KSPEU" and JSC "ChEAZ" developed and created an experimental stand designed to verify and confirm the correctness of the selected structural and circuit solutions used in the design of a synchronous valve electric motor (SVEM) and rod control station borehole pumping unit (RC SBPU).

The object of experimental research was the prototype and prototype electric drives of oil pumping units, as well as their components: SVEM and RC SBPU.

The article discusses the ways of organizing the measuring and control channels of the measuring and information system of the experimental bench, which allows to study samples of synchronous valve motors and control stations of the sucker rod pump unit in the regimes that are as close as possible to real field conditions simulating the operation of the oil pumping unit of the sucker rod pump unit.

Thus, in the experimental stand, analog, discrete and digital control and control channels are implemented.

**Keywords:** analog-to-digital converter, hardware-software complex, measurement channel, control channel, sensor, stand.

**Acknowledgments:** The publication of the article was carried out within the framework of the project "Creation of a series of electric drives on the basis of Russian high-performance synchronous engines for oil pumping machines using wireless data transmission systems and an adaptive control system for smart deposits", Agreement No. 074-11-2018-020 with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of May 30, 2018.

**For citation:** Tsvetkov AN, Kornilov VYu, Safin AR, Logacheva AG, Petrov TI., Kuvshinov NE. Control measuring and information system of the experimental stand. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(4):88-98. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-88-98.

## Введение

При разработке и конструировании электроприводов для станков-качалок нефти, применяемых на ШСНУ, возникает проблема разработки аналитических и экспериментальных методов и аппаратно-программных средств контроля работоспособности электроприводов на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами в нормальных и аварийных (критических) режимах работы. Одним из возможных путей решения данной проблемы являются длительные полевые испытания на действующих установках, что влечет за собой необходимость в привлечении больших материальных ресурсов и привлечения большого количества специалистов, занимающихся настройками отдельных систем, входящих в состав электропривода [1]. В качестве альтернативного пути решения предлагается проведение исследований и испытаний электроприводов на экспериментальных стендах, позволяющих приблизить условия работы к реальным полевым испытаниям [2,3].

Основное назначение стенда это проверка соответствия техническим требованиям СВЭД и станции управления как составных частей электропривода, проведение исследовательских, приемо-сдаточных и периодических испытаний, настройки и отладки программного обеспечения составных частей электропривода, проверки нагрузочных характеристик СВЭД, проверки и подтверждения выбранных конструктивно-схемных решений.

Реализация требований, предъявляемых к стенду, стала возможной благодаря применению новых научно-технических решений и разработке аппаратно-программного комплекса управления стендом [4,5].

Обзор разрабатываемых ранее стендов показал [6,7,8], что традиционно было принято применять в качестве нагрузочного органа электродвигатель постоянного тока с системой питания, построенной на изменении напряжения. Данный способ нагружения обладает рядом недостатков, основные из которых это отсутствие момента на валу двигателя при нулевых скоростях и сложность создания переменного момента при изменяющихся скоростях вращения [9,10].

Задачи, решаемые стендом: проверка на соответствие техническим требованиям СВЭД и систему управления (СУ ШСНУ) как составных частей электропривода и в целом системы электропривода станка-качалки нефти; проведение исследовательских, приемосдаточных и периодических испытаний; настройка и отладка программного обеспечения станции управления электропривода; проверка нагрузочных характеристик СВЭД.

#### **Состав испытательного стенда**

В состав стенда вошли силовая система в составе силового привода и нагружения и система управления ШСНУ. Силовая система построена на основе преобразователей частоты с их управлением по цифровым, аналоговым и дискретным каналам. Аналоговые и дискретные каналы управления в совокупности с цифровыми, применены для повышения надежности управления системой нагружения. Система управления экспериментальным стендом имеет в своем составе каналы измерения таких величин, как частота и сила тока, напряжение питающей сети, угловая частота вращения выходного вала СВЭД и механический момент на валу, температура окружающей среды и в отсеках станции управления, корпусов электродвигателей и их статорных обмоток, каналы управления исполнительными устройствами и каналы формирования цифровых сигналов от имитируемых датчиков.

Аналоговые каналы системы управления реализованы на принципе измерения сигнала с последующим преобразованием его в цифровой вид с применением коэффициентов масштабирования. Например, для измерения напряжения и тока, потребляемого системой нагружения стенда, а также для реализации каналов контроля скорости и тока нагрузочного преобразователя частоты, применены датчики с аналоговым выходным сигналом в виде напряжения 0...10 В с пределом основной приведенной погрешности не более 0,5%. Устройства АЦП, реализованные на основе модулей *USB 6001* производства *National Instruments*, получают измеренный сигнал и преобразуют его в соответствии с заданными коэффициентами в цифровую величину 0...500 В и 0...100 А.

В системе управления присутствуют дискретные сигналы, предназначенные для управления режимами работы преобразователей частоты и формирования имитационных сигналов от внешних устройств для СУ ШСНУ и реализации каналов управления режимами нагрузочного преобразователя частоты при помощи модулей дискретных выводов МУ110 производства компании «ОВЕН».

Каналы контроля и управления нагрузочным преобразователем частоты, входящим с систему нагружения стенда производства компании АВВ показаны на рисунке 1.

Для контроля состояния преобразователя частоты реализованы два аналоговых канала напряжения постоянного тока 1...10 В для контроля скорости вращения вала нагрузочного двигателя и постоянного тока 0...20 мА для контроля выходного тока преобразователя частоты. Выходы этих каналов подключены к АЦП с применением коэффициентов преобразования 0...1500 об/мин для первого канала 0...75А – для второго.

Управление режимами работы нагрузочного преобразователя частоты осуществляется по дискретным каналам, реализуемым с помощью модуля дискретных выводов. При проведении испытаний используется три канала: «Пуск/Стоп» для включения и отключения режима работы преобразователя; «Вперед/Назад» для изменения направления вращения двигателя, то есть нагрузочный двигатель либо нагружает испытуемый двигатель (режим противовключения), либо разгоняет его для имитации режима большой разбалансировки станка-качалки нефти; «Выбор управления скоростью/моментом» для изменения режима процесса испытания либо разгон либо нагрузка испытываемого электродвигателя моментом. Отдельно следует выделить испытание для определения ЭДС вращения, когда нагружающий двигатель выполняет роль приводного двигателя, вращая ротор обесточенного СВЭД.

|                                       |    | X21   |   |
|---------------------------------------|----|-------|---|
|                                       | 1  | VREF  | Опорное напряжение 10 В=  |
|                                       | 2  | GND   | $1 \text{ кОм} \leq R_{\text{нагр}} \leq 1 \text{ кОм}$   |
| Канал управления скоростью 0...10В    | 3  | AI1+  | Задание скорости. 0(2) ... 10 В, $R_{\text{вх}} > 200 \text{ кОм}$                                  |
|                                       | 4  | AI1-  |   |
| Канал управления моментом 0...20мА    | 5  | AI2+  | Опорное значение крутящего момента.   |
|                                       | 6  | AI2-  | 0(4) ... 20 мА, $R_{\text{вх}} = 100 \text{ Ом}$  |
|                                       | 7  | AI3+  | По умолчанию не используется.   |
|                                       | 8  | AI3-  | 0(4) ... 20 мА, $R_{\text{вх}} = 100 \text{ Ом}$  |
| Канал контроля скорости 0...10В       | 9  | AO1+  | Скорость двигателя 0(4) ... 20 мА $\cong$   |
|                                       | 10 | AO1-  | 0 ... ном. скор. двигателя, $R_{\text{нагр}} \leq 700 \text{ Ом}$                                   |
| Канал контроля тока 0...20мА          | 11 | AO2+  | Выходной ток 0(4) ... 20 мА $\cong$ 0 ... ном. ток двигателя, $R_{\text{нагр}} \leq 700 \text{ Ом}$ |
|                                       | 12 | AO2-  |   |
|                                       |    | X22   |   |
| Дискретные каналы управления режимами | 1  | DI1   | Пуск/Стоп   |
|                                       | 2  | DI2   | Вперед/Назад  |
|                                       | 3  | DI3   | Выбор управления скоростью/моментом   |
|                                       | 4  | DI4   | Постоянная скорость 4, параметр 12.05   |
|                                       | 5  | DI5   | Выбор ускорения и замедления  |
|                                       | 6  | DI6   | Разрешение пуска  |
|                                       | 7  | +24 В | +24 В, 100 мА макс.   |
|                                       | 8  | +24 В |   |
|                                       | 9  | DGND1 | Цифровая земля  |
|                                       | 10 | DGND2 | Цифровая земля  |
|                                       | 11 | DI IL | Блокировка пуска (0 = стоп)   |

Рис. 1. Реализация каналов контроля и управления нагрузочным преобразователем частоты ABB с платой входов/выходов RMIO.

Режим имитации большой разбалансировки станка-качалки применяется для отработки методов обхода ситуации, возникающей при движении балансира вверх, а грузов кривошипа вниз, и при неправильном положении грузов, вызывающей разгон приводного двигателя. В данной ситуации двигатель, вращается с частотой превышающую частоту питания от преобразователя частоты. При этом напряжение цепи постоянного тока преобразователя частоты повышается и сбрасывается на тормозной резистор с целью избегания выхода из строя элементов силовой цепи. При отсутствии тормозного резистора напряжение цепи постоянного тока преобразователя частоты растет до установленных пределов, после чего срабатывает защита и электродвигатель отключается. Избежать аварийного отключения возможно применив метод кратковременного повышения частоты вращения электродвигателя до окончания спуска грузов.

В зависимости от выбранного режима работы нагрузочного преобразователя, управление скоростью или моментом, ЦАП станда осуществляет преобразование задаваемого в цифровом виде значения управляющего сигнала в аналоговый сигнал 0...10 В для канала управления скоростью или 0...20 мА для канала управления моментом. Такой принцип позволяет системе управления создавать переменный крутящий момент на валу испытываемого двигателя для имитации работы станка качалки-нефти и выполняет одно из требований технического задания, предъявляемых к стенду: нагрузочные характеристики электропривода должны задаваться при помощи пульта станда, пульт должен выдавать пропорциональный моменту аналоговый сигнал – на токовый вход электропривода. Период циклических изменений момента нагрузки должен задаваться в пределах 1...200 секунд.

В составе станда включен датчик момента на валу СВЭД типа М40 производства ООО «Тилком», измеряющий момент в пределах от нуля до 150, 500 или 1200 Нм, показанный на рис. 2. Датчик момента имеет в своем составе аналого-цифровой канал преобразования, выход которого подключен к аппаратно-программному комплексу через HMI интерфейс по кабелю USB посредством преобразователя интерфейсов.

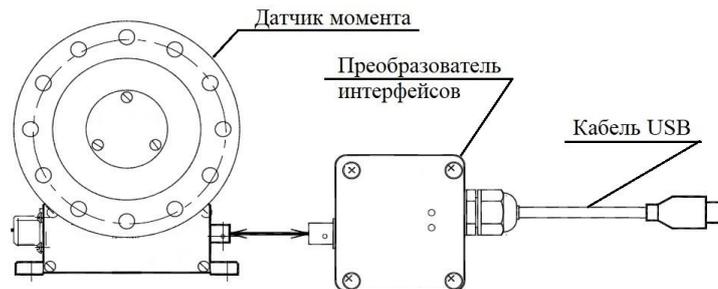


Рис. 2. Датчик момента М40 с каналом преобразования сигналов

Датчик момента имеет собственное программное обеспечение для обработки и отображения результатов измеренных значений момента, скорости вращения, механической мощности и температуры. Пределы основной приведенной погрешности измерения датчика момента составляет не более 0,2%, преобразователь интерфейсов передает данные со скоростью 100 кбит/с, с частотой дискретизации 5 кГц. Для ввода измеренных параметров данного датчика в систему управления было разработано специальное программное обеспечение, получающее информацию от датчика и передающее ее системе управления через файл, сохраняемый на жестком диске персонального компьютера и доступный для считывания АПК. Измеренная механическая мощность на валу испытываемого двигателя позволяет производить вычисление его коэффициента полезного действия.

Дополнительные дискретные каналы, реализованные в системе управления, выполняют функцию имитации сигнала от датчика прохождения балансиром станка-качалки нижней мертвой точки, необходимые СУ ШСНУ для начала отсчета длительности цикла качания, и имитируют аварийные сигналы высокого и низкого давления в трубопроводе.

Аппаратно-программный комплекс (АПК) стенда имеет возможность формирования сигналов цифровых датчиков, имитирующих работу станка-качалки нефти в режимах нормальной работы, предаварийных и аварийных. Основным протоколом управления и передачи данных по цифровой сети стенда является интерфейс *RS-485 – ModBus RTU* – промышленный открытый протокол, позволяющий работать на скоростях передачи данных до 115 кБод/сек.

Одна из функциональных возможностей стенда – формирование имитируемой динамограммы. На рис. 3 представлена динамограмма ШСНУ, полученная авторами при проведении исследований действующего станка-качалки нефти, которая имеет явные отличия от формы параллелограмма для идеальной динамограммы. Как указывают многие авторы [11...15], для различных дефектов в механической части ШСНУ характерны устойчивые изменения формы реальных динамограмм. Так, на приведенной динамограмме (см.рис.3) в правом верхнем углу наблюдается небольшой «горб», который указывает на такой дефект насоса, как высокая посадка плунжера. А искажение правой части динамограммы свидетельствует о снижении дебита из-за наличия попутного газа в скважинной жидкости.

Идеальная динамограмма представляет собой параллелограмм с углами в точках *A*, *B*, *C* и *D* (рис. 3). Участок *A-B* это участок перехода балансира через нижнюю мертвую точку, участок *B-C* это ход штока вверх до верхней мертвой точки, участок *C-D* это переход балансира через верхнюю мертвую точку и участок *D-A* это ход штока вниз. Для имитации режима работы электропривода в условиях максимально приближенных к реальным, динамограмма «разворачивается» во времени и представляет собой график, показанный на рис. 4.

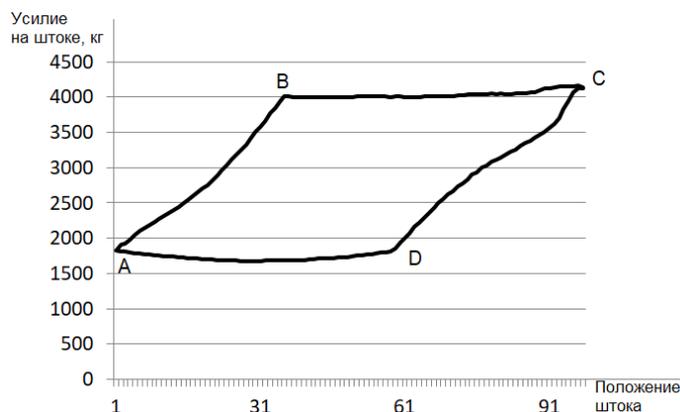


Рис. 3. Пример имитируемой динамограммы, полученной авторами на действующем станке-качалке нефти динамографом «Геостар-101»

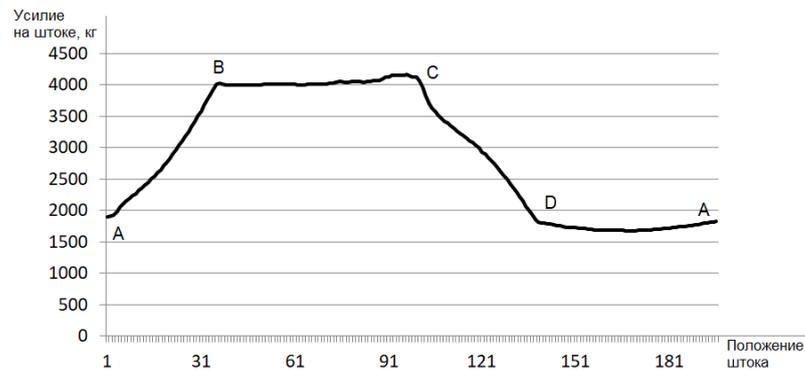


Рис. 4. Динамограмма станка-качалки, развернутая во времени

### Основные результаты

Для изменения режимов имитации состояния станка-качалки экспериментатор имеет возможность изменения вида воздействия на испытываемый двигатель. В данном случае это могут быть режимы работы станка-качалки с незначительной разбалансировкой, с сильной разбалансировкой, при обрыве штанг или сильном влиянии газа и при заклинивании насоса. Экспериментатор имеет возможность изменения максимального, минимального значений и периода качания. Выбранный вид типа нагрузки должен показать системе управления станции управления испытываемого двигателя на ту или иную неисправность с целью проверки адекватности работы заложенных алгоритмов управления. Система управления, при этом, должна отреагировать на изменение состояния скважины и, если это необходимо, предпринять действия, направленные на предотвращение возникновения аварийной ситуации.

В окне управления аппаратно-программного комплекса осуществляется визуализации основных контролируемых параметров и управление режимами работы стенда. Самыми ответственными параметрами при испытании являются токи нагрузки двигателей и их температуры, поэтому в программе реализован ряд защит, связанных с отслеживанием максимальных токов и скорости изменения температуры. Например, при превышении выходного тока нагрузочного преобразователя, система автоматически снижает величину момента на валу двигателя. Аналогично система реагирует на резкое снижение скорости вращения двигателя.

Все измеряемые параметры визуализируются с помощью системы виртуальных приборов, преобразующих величины в цифровой вид с требуемой размерностью и в вид стрелочных приборов.

Разработанные виртуальные приборы имеют широкий спектр настроек, позволяющий применять их для решения любых задач. В приборах настраиваются минимальная, максимальная величина, шаг сетки шкалы, размерность величины дублирующей цифровой записи. Стрелочные виртуальные приборы имеют возможность отображения измеряемой величины в масштабе, соответствующем текущему значению в автоматическом режиме. Это позволяет увеличить степень считываемости значения, и избежать ситуации, когда шкала прибора рассчитана на большую величину, а отображаемая величина мала.

В зависимости от назначения прибора, он может быть модифицирован в вид стрелочного, стрелочного кругового, цифрового или столбчатого, когда от отображаемой величины зависит высота шкалы прибора. Кроме этого, в приборах реализована возможность фиксации максимального измеренного значения в виде яркой стрелки, которое сбрасывается простым нажатием на прибор.

Такие параметры как момент на валу двигателя, скорость вращения и механическая мощность визуализированы с помощью круговых приборов, более удобных для восприятия экспериментатором, с фиксацией максимальных достигнутых значений.

На окне визуализации аппаратно-программного комплекса имеется виртуальный прибор отображения измеряемых величин в графическом виде. Для удобства восприятия процесса испытания имеется виртуальный прибор отображения положения элементов станка-качалки нефти – балансира и кривошипа. Все измеряемые параметры дополнительно отображены на схеме, показывающей процесс испытания вблизи точек системы стенда, из которых они получены.

В ходе проведения испытаний, все измеряемые величины сохраняются аппаратно-программным комплексом в файле с возможностью их последующей обработки.

На рис. 7 показан график изменения величины крутящего момента на валу испытываемого двигателя в зависимости от заданного воздействия. График показывает, что система электропривода адекватно реагирует на изменение нагружающего воздействия и при этом скорость вращения двигателя изменяется в пределах 1...2 об/мин, что соответствует отклонению в пределах 0,27% и это поведение свойственно синхронным двигателям с правильно настроенной системой управления (см. рис. 7). Изменения скорости вращения вала испытываемого двигателя, показанные на рис. 7, соответствуют во времени нагрузке, показанной на рис. 6, кроме этого, для удобства на графике добавлена линия тренда, сглаживающая резкие скачки показаний датчика.

В число фиксируемых аппаратно-программным комплексом величин входят величины напряжения, тока и мощности, выделяемые в так называемые ваттметрограммы. Ваттметрограммы позволяют проводить оценку правильности настройки частотного преобразователя, входящего в состав системы электропривода испытываемого двигателя.

Ваттметрограммы, являются расчетными величинами, получаемыми на основе данных, считанных АЦП с датчиков тока и напряжения, входящих в состав системы управления экспериментального стенда.



Рис. 6. Момент нагрузки на валу испытываемого двигателя, полученный датчиком момента М40 за один цикл качания

АПК стенда имеет возможность перевода датчиков напряжения и тока и соответствующих им АЦП в режим измерения мгновенных значений. Данные измерения позволяют проводить оценку качества потребляемой электроэнергии и воздействие на сеть электропривода.

Алгоритм обработки сигнала основан на вычислении действующего значения напряжения и тока по принципу определения среднеквадратичного значения. В зарубежной терминологии применяется аббревиатура *RMS (rms) - root mean square*.

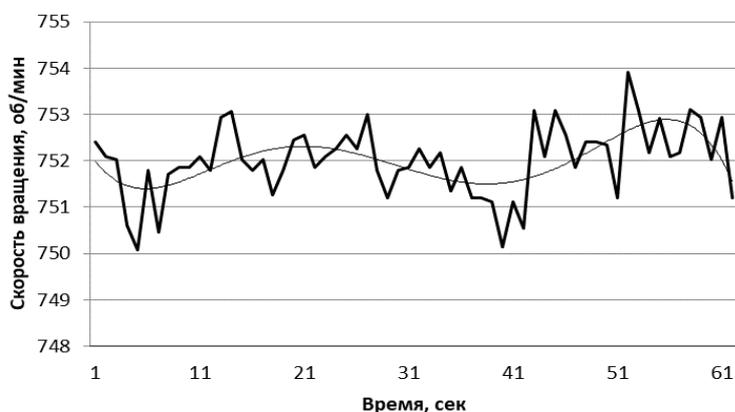


Рис. 7. Скорость вращения вала двигателя за один цикл качания при изменяемом моменте нагрузки

Действующее значение тока и напряжения, при этом, можно определить по формуле:

$$I_{RMS} = \sqrt{\int_{-x/2}^{x/2} I^2(t)dt}, \quad U_{RMS} = \sqrt{\int_{-x/2}^{x/2} U^2(t)dt}, \quad (1)$$

На практике измеряемый период делится на некоторое число частей, соответствующих частоте дискретизации измерительной системы, и измеряется напряжение и ток на каждом из участков. Таким образом, получаются функции  $U(t)$  и  $I(t)$ . Точнее, не сами функции, а таблицы их значений – поэтому от интегрирования необходимо перейти к суммированию:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} I_i^2}, \quad U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} U_i^2}, \quad P_{act} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} U_i I_i} \quad (2)$$

Здесь  $N$  – количество отсчётов, приходящееся на один период сетевого напряжения.

Для доказательства правильности работы системы с пониженной частотой дискретизации были построены математические модели напряжения синусоидальной формы и вычислены среднеквадратические значения для различного количества точек измерения. Результаты работы моделей показаны на рис. 8 и 9.

Как видно из рис. 8, для получения стабильной величины среднеквадратического значения напряжения, достаточно оцифровать первую полуволну при частоте дискретизации каждые 0,3мс, т.е. достаточно первых 32 значений мгновенных величин напряжения. При этом вычислительная система получает 64 значения на период напряжения или 3200 значений в секунду. Производя расчет среднеквадратического значения по 32 значениям, можно получить до 100 значений в секунду.

При снижении частоты дискретизации напряжения до выборки каждые 1,5мс (см. рис.9), в среднем на период напряжения приходится 14 значений напряжения, но стабильная величина среднеквадратического значения напряжения получается лишь при обработке 32 значений, т.е. каждые 48мс или 20 значений в секунду. Снижение частоты дискретизации может понадобиться при необходимости ввода в программу расчетов дополнительных величин, таких как частота сети, коэффициент мощности и других.

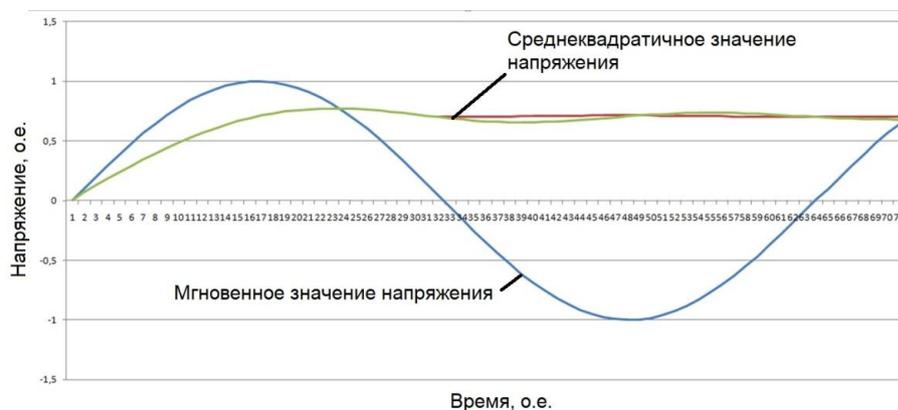


Рис. 8. Расчет среднеквадратического значения величины напряжения при частоте дискретизации каждые 0,3мс

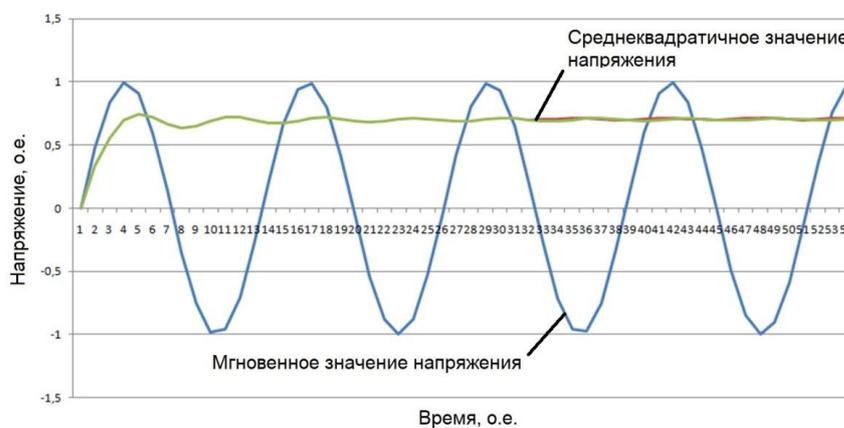


Рис.9. Расчет среднеквадратического значения величины напряжения при частоте дискретизации каждые 1,5мс

## Выводы

Экспериментатор в ходе испытаний имеет возможность выбора различных типов динамограмм, которые представлены в виде массива данных, показывающих нагрузку на шток в зависимости от длины перемещения полированного штока, передается по цифровой сети на СУ ШСНУ. Оператор имеет возможность изменения максимального и минимального значения усилия на штоке. Кроме этого, экспериментатором параллельно выбирается вид переменного крутящего момента на валу испытываемого двигателя, который имеет однозначную связь с характеристикой динамограммы станка-качалки нефти.

Таким образом реализовано еще одно требование к стенду: должна быть предусмотрена возможность задания как постоянных нагрузочных характеристик, так и переменных (циклических) в соответствии с ваттметрограммой и типовой динамограммой, развернутой во времени, на пульте стенда должна быть предусмотрена оперативная регулировка амплитуды и периода задаваемых динамограмм.

Аналогично сигналам динамограмм формируются имитационные сигналы от таких датчиков, как устьевой датчик давления и расходомер.

В состав системы управления стенда включены программируемые логические контроллеры, которые решают несколько задач: в процессе проведения испытаний участвуют в обработке данных, полученных от датчиков, имеют возможность управления преобразователем частоты, встроенным в станцию управления и позволяют проверить правильность функционирования заложенных алгоритмов управления станком - качалкой с последующей загрузкой их в СУ ШСНУ.

Таким образом в экспериментальном стенде реализованы аналоговые, дискретные и цифровые каналы контроля и управления. Аналоговые каналы построены на 16 разрядных ЦАП и АЦП с пределом основной приведенной погрешности не более 0,25%. Технические решения, заложенные в конструкцию стенда, а также гибкость алгоритмов работы системы управления позволяют проводить широкий спектр исследований с применением разнообразных объектов испытания.

## Литература

1. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В. и др. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом. «Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики». 2018. Т. 20. № 7-8. С. 107-116.
2. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., et.al. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. V. 62. № 7. pp. 3546-3550.
3. Андреева Н.В., Ахунов Д.Д., Корнилов В.Ю. Способ контроля метрологических характеристик систем управления электроприводов переменного тока. Патент РФ № 2012136090, МПК G01R31/00, Оpubл. 22.01.2015. Бюл. №12.
4. Saihi L., Boutera A. Robust Sensorless Sliding Mode Control of PMSM with MRAS and Luenberger Extended Observer. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC 2016). 2016. pp. 48-57.
5. Ахунов Д.Д., Давлетшин Р.Ф., Корнилов В.Ю. Построение нормализованных моделей измерительных контуров системы «преобразователь частоты-асинхронный двигатель». - Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2011. № 2 (9). С. 36-40.
6. Gracheva E.I., Naumov O.V., Gorlov A.N. Modelling Characteristics of Reliability Low-Voltage Switching Devices on the Basis of Random Checks on the Example of Contactors. (2019) Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, article № 8947595, pp. 641-643.
7. Андреева Н.В., Ахунов Д.Д., Корнилов В.Ю. Расчетно-экспериментальное оценивание погрешностей измерительных каналов системы «преобразователь частоты VLT 5000 FLUX – асинхронный двигатель». Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 1-2. С. 122-126.
8. Нугаев И.Ф., Искужин Р.В. Комплекс математических моделей для решения задач синтеза алгоритмов управления процессами в нефтедобывающих скважинах // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. № 8(53). С. 36-44.
9. Dong L., Han X., Hua L. Effects of the rotation speed ratio of double eccentricity bushings on rocking tool path in a cold rotary forging press. Journal of Mechanical Science and Technology. 2015. V. 29. № 4.
10. Morimoto S., Kawamoto K., Sanada M., et.al. Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame. Proc. 2001 IEEE IAS Annual Meeting. 2011. V. 4. pp. 2637-2644.

11. Ивановский В.Н., Садчиков Н.В., Улюмджиев А.С. К вопросу оптимизации закона движения выходного звена привода скважинной штанговой насосной установки // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2012. № 5. С. 86–90.

12. Софьина Н.Н., Шишляников Д.И., Корнилов К.А. и др. Способ контроля параметров работы и технического состояния штанговых скважинных насосных установок/ Master's Journal. 2016. № 1. С. 247-257.

13. Lindh T., Montonen J.-H., Grachev M. Generating surface dynamometer cards for a sucker-rod pump by using frequency converter estimates and a process identification run. IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Riga, 2015. pp. 416-420.

14. Шишляников Д.И., Рыбин А.А. Оценка нагруженности балансирных станков-качалок по параметрам питания электропривода. С-Пб.: Записки Горного института, 2017. Т.227.С. 47 – 54.

15. Пачин М.Г., Лоскутников В.А. Результаты испытаний станции управления АО «ПНППК» для вентильных электродвигателей станков-качалок. М.:Территория нефтегаз. 2016. №6, С.78-83.

### Авторы публикации

**Цветков Алексей Николаевич** – канд.техн.наук., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Корнилов Владимир Юрьевич** – д-р.техн.наук., профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

**Сафин Альфред Робертович** – канд.техн.наук., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Логачева Алла Григорьевна** – канд.техн.наук., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Петров Тимур Игоревич** – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Кувшинов Никита Евгеньевич** – ассистент кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Petrov TI, Safin AR., Ivshin IV, et.al. Model of a pumping unit control system based on synchronous motors with a sensorless method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;7-8:107-116.

2. Aranovskiy S, Bobtsov A, Ortega R, et.al. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017;62(7):3546-3550.

3. Andreeva NV, Akhunov DD, Kornilov VYu. A method for monitoring the metrological characteristics of control systems for AC electric drives. RF patent N. 2012136090, IPC G01R31 / 00, Publ. 01/22/2015, Bull. N. 12.

4. Saihi L, Boutera A. Robust Sensorless Sliding Mode Control of PMSM with MRAS and Luenberger Extended Observer. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC 2016). 2016, pp. 48-57.

5. Akhunov DD, Davletshin RF, Kornilov VYu. Construction of normalized models of measuring circuits of the "frequency converter-asynchronous motor" system. *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2011;2 (9):36-40.

6. Gracheva EI, Naumov OV, Gorlov AN. *Modelling Characteristics of Reliability Low-Voltage Switching Devices on the Basis of Random Checks on the Example of Contactors*. (2019) Proceedings 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, article № 8947595, pp. 641-643.

7. Andreeva NV, Akhunov DD, Kornilov VYu. Settlement and experimental error estimation of measuring channels of the VLT 5000 FLUX frequency inverter - asynchronous motor system. *News of higher educational institutions. Energy issues*. 2012;1-2:122-126.

8. Nugaev IF, Iskuzhin RV. A complex of mathematical models for solving the problems of synthesis of process control algorithms in oil wells. *Vestnik UGATU*. 2012;16:8 (53):36-44.

9. Dong L, Han X, Hua L. Effects of the rotation speed ratio of double eccentricity bushings on rocking tool path in a cold rotary forging press. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29:4.

10. Morimoto S, Kawamoto K, Sanada M, et.al. *Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame*. Proc. 2001 IEEE IAS Annual Meeting. 2011;4:2637-2644.

11. Ivanovsky VN, Sadchikov NV, Ulyumdzhiyev AS. On the issue of optimizing the law of motion of the output link of a downhole sucker rod pump driv. *Territory «NEFTEGAZ»*. 2012;5:86-90.

12. Sofina NN, Shishlyannikov D, Kornliov KA. et al. A method for monitoring operation parameters and technical condition of sucker rod pumping units. *Master's Journal*. 2016;1:247-257.

13. Lindh T, Montonen J.-H, Grachev M. *Generating surface dynamometer cards for a sucker-rod pump by using frequency converter estimates and a process identification run*. IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Riga, 2015. pp. 416-420.

14. Shishlyannikov DI, Rybin AA. *Assessment of the load of balancing rocking machines according to the power parameters of the electric drive*. St. Petersburg .: Notes of the Mining Institute, 2017;227:47-54. doi: 10.25515 / 1.2017.5.582.

15. Pachin MG, Loskutnikov VA. *Test results of the control station of JSC "PNPPK" for valve electric motors of pumping units*. M.: Territory oil and gas. 2016;6:78-83.

### **Authors of the publication**

*Alexey N. Tsvetkov* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Vladimir Yu. Kornilov* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Alfred R. Safin* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Alla G. Logacheva* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Timur I. Petrov* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Nikita E. Kuvshinov* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Поступила в редакцию*

*09 мая 2020г.*

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 543.544.25.

DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-4-99-105

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АРСЕНИРОВАННЫХ СОРБЕНТОВ

А.В. Танеева, В.К. Ильин

Казанский государственный энергетический университет, Казань,  
Россия

[alinataneeva@mail.ru](mailto:alinataneeva@mail.ru)

**Резюме:** В работе рассмотрено применение арсенированных органических соединений в качестве селективных сорбентов для разделения и анализа сложных органических смесей. На основе хроматографических факторов полярности установлено, что исследуемый ряд сорбентов характеризуется высокой гидроксильной селективностью разделения анализируемых сорбатов, обусловленной наличием в структуре их молекулы арсенильного кислорода, обладающего неподеленной электронной парой. Показано, что функциональные заместители в структуре молекулы арсенированных сорбентов оказывают непосредственное влияние на хроматографические факторы полярности, значения которых увеличиваются при введении в структуру молекулы функциональных заместителей, находящихся в пара-положении фенильного кольца. Найдено, что для бензола наблюдаются относительно низкие значения хроматографического фактора полярности ( $x$ ), который также повышается в пара-положении кольца.

На основе пятимерного пространства и проекции на плоскость, соответствующую хроматографическим факторам полярности, выявлены арсенированные сорбенты с экстремальными характеристиками, которые обладают более высокими хроматографическими факторами полярности ( $y$ ) по сравнению с известными аналогами. На основе проведенных исследований выявлено, что арсенированные сорбенты показывают высокую селективность разделения алифатических спиртов от углеводов. Таким образом, при разработке конкретных методик анализа сложных спиртово-углеводородных смесей нами предлагается использовать арсенированные соединения в качестве селективных сорбентов, предназначенных для разделения и анализа веществ, способных в условиях газо-жидкостной хроматографии образовывать межмолекулярные водородные связи. При этом их времена удерживания являются более высокими, чем аналогичные характеристики неполярных соединений. Это позволяет разделять анализируемые компоненты с близкими временами удерживания.

**Ключевые слова:** сорбенты, сорбаты, арсенированные сорбенты, газо-жидкостная хроматография, хроматографические факторы полярности, индексы удерживания, треугольник Брауна.

**Для цитирования:** Танеева А.В., Ильин В.К. Разработка метода контроля органических объектов с использованием арсенированных сорбентов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. № 4. С. 99-105. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-99-105.

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR MONITORING ORGANIC OBJECTS USING ARSENATED SORBENTS

AV. Taneeva, VK. Ilyin

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

alinataneeva@mail.ru

**Abstract:** *The paper considers the use of arsenic organic compounds as selective sorbents for the separation and analysis of complex organic mixtures. Based on the chromatographic factors of polarity, it was found that the studied sorbents range is characterized by high hydroxyl selectivity of the analyzed sorbates separation, due to the arsenyl oxygen presence in the structure of their molecule, which has an unshielded electron pair. It is shown that the functional substituents in the structure of the arsenic sorbents molecule have a direct effect on the chromatographic factors of polarity, the values of which increase when the functional substituents in the phenyl ring (para-position) are introduced into the structure of the molecule. It was found that relatively low values of the chromatographic polarity factor ( $x$ ) are observed for benzene, which also increases in the para-position of the ring.*

*Based on the five-dimensional space and projection on the plane corresponding to the chromatographic factors of polarity, arsenic sorbents with extreme characteristics that have higher chromatographic factors of polarity ( $y$ ) in comparison with known analogues were identified. Based on the conducted research, it was found that arsenic sorbents show high separation selectivity of aliphatic alcohols from hydrocarbons. Thus, when developing specific methods for the analysis of complex alcohol-hydrocarbon mixtures, we propose to use arsenic compounds as selective sorbents intended for the separation and analysis of substances capable of forming intermolecular hydrogen bonds under gas-liquid chromatography. At the same time, their retention times are higher than similar characteristics of non-polar compounds. This allows you to separate the analyzed components with close retention times.*

**Keywords:** *sorbents, sorbat, arsenic sorbents, gas-liquid chromatography, chromatographic factors of polarity, the retention indices, Brown's triangle.*

**For citation:** Taneeva AV, Ilyin VK. Development of methods for monitoring organic objects using arsenated sorbents. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(4):99-105. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-99-105.

### Введение

В энергетической отрасли промышленности для контроля различных технологических процессов широко применяются хроматографические методы анализа, которые характеризуются экспрессностью и низкой погрешностью определяемых компонентов [1-2]. При этом большое внимание уделяется контролю маслonaполненного электрооборудования хроматографическими методами, результаты которых используются для диагностики развивающихся дефектов в силовых трансформаторах [3-5]. Для экспрессного контроля содержания продуктов деструкции бумажной изоляции и различных присадок в трансформаторном масле используют метод высокоэффективной тонкослойной хроматографии на пластинках «Sorbfill», импергированных люминофором, что позволяет проводить идентификацию компонентов в ультрафиолетовом свете.

При разработке методик хроматографического анализа органических веществ на первый план выступает проблема выбора оптимального по селективности сорбента, поскольку от его характеристик зависит последовательность выхода компонентов из хроматографической колонки, их селективность разделения, а также воспроизводимость получаемых результатов и их точность при количественных расчетах. В настоящее время для газо-жидкостной хроматографии применяется большое количество сорбентов с самыми разнообразными характеристиками. В частности, используются в качестве сорбента фторированные вещества, для которых разработан и описан механизм взаимодействия с анализируемыми сорбатами, ответственными за селективность разделения [6-9].

Были получены новые полимерные сорбенты на основе кремнезёма, покрытого полиэтиленгликолем и сшитого поликарбоновой кислотой [10], а также поли(метил-2-гидроксипенто-4-енил) силаном [11] и октадецилсиланом [12]. Для капиллярной газо-жидкостной хроматографии были получены поли[олиго(этиленгликоль) диакрилаты] и исследованы их свойства. Найдено, что в зависимости от молярной массы мономера

наблюдался переход стеклообразного состояния в кристаллическое. При этом в области перехода стеклообразования и температуры плавления наблюдается селективность разделения компонентов, близкая к полиэтиленгликолю [13].

Для классификации сорбентов для газожидкостной хроматографии предлагаются различные подходы, основанные, как правило, на хроматографических факторах полярности Роршайдера и Мак-Рейнольдса [14-16]. В работах [17-18] классификацию сорбентов для газовой хроматографии предлагается рассматривать на основе трехпараметрической модели межмолекулярных взаимодействий с теоретическим описанием характеристик полярности. К сожалению, в этих работах не приводится примерная классификация большого ассортимента сорбентов, широко используемых в газовой хроматографии для разделения и анализа органических соединений.

#### Методика исследования

Эксперимент проводили на газо-жидкостном хроматографемарки Кристаллюкс-4000М с пламенно-ионизационным детектором. Насадочные колонки заполняли арсенированными сорбентами, которые готовили по стандартной методике. Растворяли необходимое количество арсенированных веществ в этиловом спирте, раствор заливали в емкость с твердым носителем и нагревали до температуры 100 °С. Полученный таким образом сорбент загружали в хроматографическую колонку и кондиционировали при температуре 120 °С в течение пяти часов.

Расчет хроматографических факторов полярности Роршайдера проводили на основе логарифмических индексов удерживания:

$$I = 100 \frac{\lg t'_R - \lg t'_z}{\lg t'_{z+1} - \lg t'_z} + 100z \quad (1)$$

где:  $t'_R$  – приведенное время удерживания сорбата;  $t'_z$  – приведенное время удерживания алкана с числом атомов углерода в молекуле ( $z$ );  $t'_{z+1}$  – приведенное время удерживания алкана с числом атомов углерода в молекуле ( $z+1$ ).

Также были рассчитаны константы полярности Роршайдера:

$$J = J_n + ax + by + cz + du + es \quad (2)$$

где:  $J$  – логарифмические индексы удерживания сорбата на колонке с исследуемым сорбентом;  $J_n$  – логарифмические индексы удерживания на колонке, заполненной неполярным сорбентом (скваланом).  $a, b, c, d, e$  – характеристики сорбата;  $x, y, z, u, s$  – характеристики сорбента, которые учитывают различные типы межмолекулярных взаимодействий.

Известно, что Роршайдер предлагал применять следующие стандартные сорбаты: бензол ( $x$ ), этанол ( $y$ ), метилэтилкетон ( $z$ ), нитрометан ( $u$ ) и пиридин ( $s$ ).

Факторы полярности исследуемых сорбентов рассчитывали как:

$$x = \frac{J - J_n}{100} \quad (3)$$

где  $J$  – логарифмический индекс удерживания сорбата на колонке с исследуемым сорбентом;  $J_n$  – логарифмический индекс удерживания сорбата на колонке со скваланом, который используется как неполярный сорбент.

В качестве объектов исследования использовали оксиды третичных арсинов, которые характеризуются достаточно сильной способностью к образованию межмолекулярной водородной связи, обусловленной наличием в структуре молекулы неподеленной электронной пары арсенильного кислорода [20-22].

Расчет долей удерживания осуществляли на основе факторов полярности по следующим формулам:

$$F_x = \frac{x}{x + y + z}; F_y = \frac{y}{x + y + z}; F_z = \frac{z}{x + y + z} \quad (4)$$

где  $F_x$ ,  $F_y$  и  $F_z$  – доли удерживания из факторов полярности по бензолу, этанолу и метилэтилкетону, сумма которых составляет единицу:

$$F_x + F_y + F_z = 1 \quad (5)$$

### Обсуждение результатов

В табл.1 приведены экспериментально полученные значения величин хроматографических факторов полярности Роршнайдера для оксидов третичных асинов. Как видно из табл., все исследованные нами вещества имеют высокие значения факторов полярности ( $y$ ). Это показывает их высокую способность образовывать межмолекулярную водородную связь в системе сорбат-сорбент между спиртами и асинами. Обнаружено, что в случае, когда функциональные заместители располагаются в пара-положении фенильного кольца, мы наблюдаем более высокие значения фактора полярности ( $y$ ) для оксидов третичных асинов (табл.1, соед.4,5). Введение в молекулу третичного асина второй арсенильной группы не приводит к повышению значений хроматографических факторов полярности (табл.1, соед.11,12). Это можно объяснить тем, что межмолекулярное взаимодействие с образованием водородной связи протекает по одному реакционному центру.

Таблица 1  
Хроматографические факторы полярности оксидов третичных асинов при температуре 100 °С

| №п<br>п | Структура оксидов третичных асинов     | Хроматографические факторы полярности |      |      |      |      |
|---------|--|---------------------------------------|------|------|------|------|
|         |  | $x$                                   | $y$  | $z$  | $u$  | $s$  |
| 1       | $(C_6H_5)_2C_2H_5AsO$                  | 3,41                                  | 8,65 | 4,39 | 7,32 | 5,31 |
| 2       | $C_6H_5(C_2H_5)_2AsO$                  | 2,18                                  | 7,73 | 3,14 | 5,96 | 3,34 |
| 3       | $4-CH_3C_6H_4(C_2H_5)_2AsO$            | 1,03                                  | 6,17 | 1,91 | 4,09 | 2,07 |
| 4       | $4-CH_3C_6H_4(C_3H_7)_2AsO$            | 1,96                                  | 8,06 | 2,82 | 5,19 | 3,10 |
| 5       | $4-CH_3OC_6H_4(C_2H_5)_2AsO$           | 2,92                                  | 8,69 | 2,19 | 5,76 | 5,17 |
| 6       | $(C_6H_5)_3AsO$                        | 1,68                                  | 3,96 | 2,07 | 3,60 | 2,41 |
| 7       | $(C_2H_5)_3AsO$                        | 1,56                                  | 8,15 | 3,53 | 7,75 | 4,43 |
| 8       | $(C_3H_7)_3AsO$                        | 1,43                                  | 8,00 | 2,23 | 5,52 | 2,80 |
| 9       | $(C_6H_{13})_3AsO$                     | 1,49                                  | 5,82 | 3,34 | 5,00 | 3,15 |
| 10      | $(C_8H_{17})_3AsO$                     | 0,84                                  | 6,43 | 1,28 | 3,57 | 1,60 |
| 11      | $(C_6H_5)_2(AsO)(CH_2)_2AsO(C_6H_5)_2$ | 1,10                                  | 6,87 | 5,27 | 4,85 | 3,88 |
| 12      | $(C_6H_5)_2(AsO)(CH_2)_4AsO(C_6H_5)_2$ | 0,80                                  | 8,46 | 3,67 | 3,32 | 5,88 |

На рис.1. приведена проекция на плоскость ( $x$ ) и ( $y$ ) из пятимерного пространства известных сорбентов и арсенированных.

Как видно из рисунка, практически все арсенированные сорбенты выходят за границы контура, соответствующего известным материалам. Это показывает, что введение в практику хроматографического анализа арсенированных сорбентов расширяет диапазон селективных возможностей газо-жидкостной хроматографии в области более высоких значений удерживания алифатических спиртов. При этом экстремально высокими значениями из всех исследуемых сорбентов наблюдаются для соединения 1 (табл.1), содержащих в качестве заместителей фенильные и этильные группы.

При этом вклад в величины удерживания алифатических спиртов является наиболее высоким для оксидов третичных асинов.

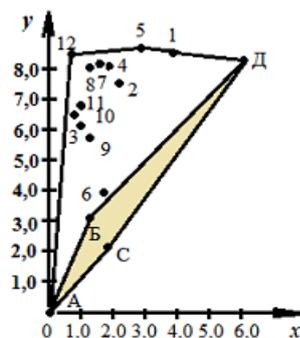


Рис.1. Проекция на плоскость ( $x$ ) и ( $y$ ) из пятимерного пространства  
А – сквалан, Б – полипропиленгликоль, С – Полифениловый эфир, Д – 1.2.3-Трис ( $\beta$ -циан-этокси) пропан. Заштрихованная область – литературные данные [19]. Номера арсенированных сорбентов соответствуют данным табл. 1.

На Рис.2 приведена относительная оценка вклада электронодонорных сорбатов в величины удерживания сорбентами, полученными на основе оксидов третичных асинов с различными функциональными заместителями на основе треугольника Брауна.

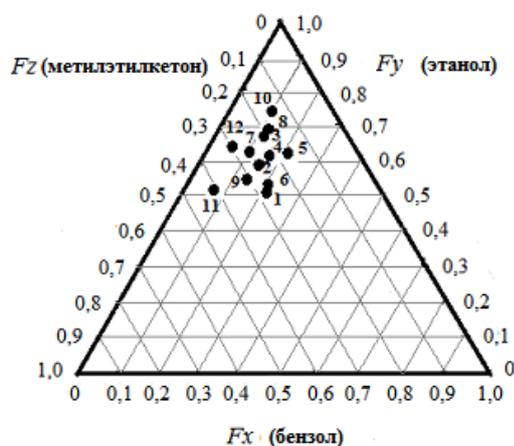


Рис.2. Относительная оценка вклада электронодонорных сорбатов в величины их удерживания сорбентами на основе оксидов третичных асинов. Экспериментальные точки соответствуют данным табл. 1.

Из рис.2 видно, что точки, которые соответствуют электронодонорным сорбатам, смещены в область, соответствующую долям удерживания этанола, что свидетельствует об относительно высокой гидроксильной селективности арсенированных сорбентов. При этом, как видно из рис 2., этот вклад определяется природой функциональных заместителей у атома мышьяка и возможностью взаимодействия неподеленной электронной парой арсенильного кислорода с анализируемыми сорбатами.

#### Закключение и выводы

На основе проведенных экспериментальных исследований выявлены арсенированные сорбенты, которые являются более селективными при разделении алифатических спиртов от ароматических углеводородов, что можно рекомендовать при разработке методик анализа спиртово-углеводородных смесей с применением новых сорбционных материалов.

#### Литература

1. Авдеева А.А. Хроматография в энергетике. М.: Энергия, 1980. 272с.
2. Новиков В.Ф., Карташова А.А., Танеева А.В. Инструментальные методы анализа. Ч. III. Газохроматографический контроль производственных процессов в энергетике: монография. Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2018. 328с.
3. Новиков В.Ф. Диагностика маслonaполненного электрооборудования хроматографическими методами. Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике В 3 т. / под общ. ред. Абдуллазянова Э.Ю., Шамсутдинова Э.В. Качество энергоснабжения, энергоэффективность и экология. Казань, 2018. Т. 3. С.139-160.
4. Танеева А.В. Новые сорбционные материалы для хроматографического контроля технологических процессов энергетических предприятий. / В кн.: Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике. В 3 т. / под общ.ред. Абдуллазянова Э.Ю., Шамсутдинова Э.В. Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2018. Т. 2. С. 395-416.
5. Карташова А.А., Новиков В.Ф. Определение фурановых соединений в трансформаторном масле газохроматографическим методом с использованием новых сорбентов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. №1-2. С.47-52.
6. Танеева А.В., Зиятдинова Р.В., Стойков И.И., и др. Влияние природы растворителей на сорбционные свойства тонкослойных пластинок «Sorbfil», модифицированных наночастицами тиакаликс[4]арен/SiO<sub>2</sub>// Сорбционные и хроматографические процессы, 2018. Т.18. №6. С.865-871.
7. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М: «Энергия», 1968. 528с.
8. Карташова А.А., Новиков В.Ф. Тонкослойная хроматография как метод контроля фурановых соединений в трансформаторном масле // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. №1-2. С.138-145.

9. Carmen T. Santasania, David S. Bell. Mechanism of Interaction Responsible for Alternative Selectivity of Fluorinated stationary Phases // LC/GC. 2016. V.29, I.2. pp. 86-92.
10. Vinca P. Babu, William J.Koros. The role of polyvi nylpyrroidone in forming open-porous, macrovoid-free mixed matrix sorbents fromTorlen, a polyamide-imide polymer // Polymer Engineering Science. 2018. V.58. I.3. pp .245-247.
11. Bernadette A.Higgins, Duare L. Simonsen, ErricJ.Houser, et.al. Synthesis and characterization of a hyper branched hydrogen bond acidic carbosilane sorbent polymer // J. of Polymer Science. Part A. Polymer Chemistry. 2010. V.48. I.14/ pp. 3000-3009.
12. Huang Chen, Yu Yang, ZhenzhenQiao, et.al. A narrow open tubular column for high efficiency liquid chromatographic separation // Analyst. 2018. V.143. I.9. pp. 2008-2011. <https://doi.org/10.1039/C7AN02065A>.
13. Kurganov A., Kanateva A., Shiryeva V., et.al. Investigation of poly[oligo(ethylene glycol) diaclylates] as potential stationary phases in GC // J. of Separation Science. 2017. V.40. I.18. pp. 3675-3681
14. Rorschneider L. Zur. Polaritat von stationaren Phases in der Gaschromatographic // Z. Analyt. Chemie. 1059. V.170. N1. pp.6-22.
15. Rorschneider L. Method of characterization for gas chromatographic separation of liquids // G. Chromatogr. 1966. V.22. N1. Pp.6-22.
16. McReynolds W.O. Characterization of some liquid phases // Chromatogr. 1970. V.8. N12. Pp.337-345.
17. Зайцева Е.А., Долгоносов А.М. Трехпараметрическая модель межмолекулярного взаимодействия как основа для классификации и выбора неподвижных фаз для газовой хроматографии// Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т.19. №5. С. 525-541.
18. Долгоносов А.М., Зайцева Е.А. Характеристика полярности неподвижной фазы в газовой хроматографии на основе теоретического описания межмолекулярных взаимодействий. II. Случай водородных связей // Сорбционные и хроматографические процессы. 2015. Т.15. №3. С. 321-332.
19. Vigdergaus M.S., Bankovskaya T.R. Preferred stationary phases for Gas Chromatography // Chromatographia. 1976. V.9. pp. 548-553.
20. Новиков В.Ф. Органические производные фосфора и мышьяка в качестве неподвижных фаз для газовой хроматографии // Журнал физической химии. 1993. Т.67. №4. С. 848-853.
21. Чернокальский Б.Д., Гельфонд А.С., Камай Г.Х. Синтез некоторых арилдиэтилларсинов и их оксидов // Журнал общей химии. 1967. Т.37. С. 1396-1399.
22. Гольдштейн И.П., Перепелкова Т.М., Гурьянова Е.Н., и др. Соотношение между энергией, длиной и распределением электронной плотности для межмолекулярной водородной связи // Докл. АН СССР. 1976. Т.226. С. 91-94.

### Авторы публикации

**Танеева Алина Вячеславовна** – к.х.н., доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Казанский государственный энергетический университет.

**Ильин Владимир Кузьмич** – д-р. т.н., профессор, зав. Кафедрой «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Avdeeva AA. *Chomatography in power engineering*. М.: Energy. 1980. 272p.
2. Novikov VF, Kartashova AA, Taneeva AV. Instrumental methods of analysis. In three parts. Part III. *Gas chromatographic control of production processes in power engineering: monograph*. Ed. by Prof. V. F. Novikov. Kazan: Kazan. State Power Engineering university. 2018; 328p.
3. Novikov VF. Diagnostics of oil-filled electrical equipment by chromatographic methods. New technologies, materials and equipment in the energy sector In 3 vol. Edited by. Abdullajanov EYu, Shamsutdinov EV. *The quality of energy supply, energy efficiency and the environment*. Kazan: Kazan. State Power Engineering university. 2018;3:139-160.
4. Taneeva AV. New sorption materials for chromatographic control of technological processes of power plants. *New technologies, materials and equipment in the energy sector*. In 3 vol. Ed. by Abdullazyanov EYu, Shamsutdinov EV. Kazan:Kazan. State Power Engineering university. 2018; 2:395-416.
5. Kartashova AA, Novikov VF. Determination of furan compounds in transformer oil gas chromatography method with the use of new sorbents. *Problemy energetiki*. 2016;1-2:47-52.

6. Taneeva AV, Ziyatdinova RV, Stoikov II, et al. Influence of the nature of solvents on the sorption properties of thin -layer plates Sorbfil modified by tiakalix nanoparticles [4]aren/SiO<sub>2</sub>. *Sorption and chromatographic processes*. 2018;18(6):865-871.
7. Lipstein RA, Shakhnovich MI. *Transformer oil*. Moscow: Energiya. 1968. 528p.
8. Kartashova AA, Novikov VF. Thin-layer chromatography as a method of monitoring of furan compounds in transformer oil. *Problemy energetiki*. 2016;1-2:138-145.
9. Carmen T. Santasania, David S. Bell. *Mechanism of Interaction Responsible for Alternative Selectivity of Fluorinated stationary Phases*. LC/GC. 2016;29(2):86-92.
10. Vinca P. Babu , William J.Koros. The role of polyvinylpyrrolidone in forming open-porous, macrovoid-free mixed matrix sorbents from Torlen, a polyamide-imide polymer. *Polymer Engineering Science*. 2018;58(3):245-247.
11. Bernadette A. Higgins, Duare L. Simonsen, ErricJ.Houser, et.al. Synthesis and characterization of a hyper branched hydrogen bond acidic carbosilane sorbent polymer. *J. of Polymer Science*. Pt A. Polymer Chemistry. 2010;48(14):3000-3009.
12. Huang Chen, Yu Yang, ZhenzhenQiao, et.al. A narrow open tubular column for high efficiency liquid chromatographic separation. *Analyst*. 2018;143(9):2008-2011. <https://doi.org/10.1039/C7AN02065A>.
13. Kurganov A, Kanateva A, Shiryayeva V, et.al. Investigation of poly[oligo(ethylene glycol) diacrylates] as potential stationary phases in GC. *J. of Separation Science*. 2017;40(18):3675-3681.
14. Rorschneider L. Zur. Polarität von stationären Phasen in der Gaschromatographie. *Z. Analyt. Chemie*. 1059;170(1):6-22.
15. Rorschneider L. Method of characterization for gas chromatographic separation of liquids. *G. Chromatogr*. 1966;22(1):6-22.
16. Mc Reynolds W.O. Characterization of some liquid phases. *G/Chromatogr*. 1970;8(12):337-345.
17. Zaitseva EA, Dolgonosov AM. three-Parameter model of intermolecular interaction as a basis for classification and selection of fixed phases for gas chromatography. *Sorption and chromatographic processes*. 2019;9(5):525-541.
18. Dolgonosov AM, Zaitseva EA. characterization of the polarity of the stationary phase in gas chromatography on the basis of the theoretical description of intermolecular interactions. II. The case of hydrogen bonds. *Sorption and chromatographic processes*. 2015;15(3):321-332.
19. Vigdergaus MS, Bankovskaya TR. Preferred station aryphases for Gas Chromatography. *Chromatographia*. 1976;9:548-553.
20. Novikov VF. Organic derivatives of phosphorus and arsenic as fixed phases for gas chromatography. *Journal of physical chemistry*. 1993;67(4):848-853.
21. Chernokulsky BD, Gelfand CA, kamay GH. the Synthesis of some of killiecrankie and their oxides. *Russian Journal of General chemistry*. 1967;37:1396-1399.
22. Goldstein IP, Perepelkova TM, Guryanova EN, et al. *The relationship between energy, length and electron density distribution for the intermolecular hydrogen bonding*. Report USSR ACADEMY OF SCIENCES.1976;226:91-94.

#### **Authors of the publication**

**Alina V. Taneeva** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: alinataneeva@mail.ru.

**Vladimir K. Ilyin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Поступила в редакцию**

**21 мая 2020г.**



## ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ ОТЛОЖЕНИЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПО ЗАТУХАНИЮ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В. Гарнышова, Е.В. Измайлова, Ю.В. Ваньков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

*garnyshova@mail.ru*

**Резюме:** Заращение теплообменных поверхностей отложениями является важной проблемой в сфере теплоэнергетики. Так как коэффициент теплопроводности отложений имеет низкие значения, то даже незначительный их слой создает большое термическое сопротивление. Отложения на поверхностях теплообменного оборудования снижают коэффициент теплопередачи, эффективность теплообмена и приводят к существенным потерям энергии. Для восстановления расчетного режима работы требуется вывод таких теплообменников из эксплуатации и чистка загрязненных поверхностей. Снизить энергетические потери можно, если своевременно выявлять отложения на поверхностях теплообмена. В работе обсуждается метод контроля толщины отложений на теплообменных поверхностях. Метод основан на анализе параметров затухания свободных колебаний контролируемого изделия. Исследования проводились на моделях поверхности теплообменного оборудования - стальных пластинах 400x160x2 мм, с разной толщиной отложений 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 мм. При исследовании акустических характеристик с каждым типом пластины проводилось десятикратное определение частот собственных колебаний. Обработка сигналов происходит в программе, которая позволяет получать и записывать данные от звукового устройства, вычислять амплитудный спектр сигнала во временной области и возвращать его в виде величины и фазы (получение спектра частот). Для определения динамики изменения спектров использовалась ранговая сумма Уилкоксона. Проведенные исследования показали, что метод свободных колебаний позволяет определять не только наличие отложений на теплообменных поверхностях, но и их толщину.

**Ключевые слова:** аппаратно-программный комплекс, отложения, теплообменное оборудование, метод свободных колебаний.

**Для цитирования:** Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. № 4. С.106-114. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114.

## CONTROL OF THICKNESS OF DEPOSITS OF HEAT EXCHANGE EQUIPMENT BY HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX

EV. Garnyshova, EV. Izmaylova, YuV. Vankov

Kazan state power engineering University, Kazan, Russia

*garnyshova@mail.ru*

**Abstract:** The deposits formation on heat exchange surfaces is an important problem in the thermal power industry. Since the thermal conductivity coefficient of deposits has low values, even a small layer of them creates a large thermal resistance. Deposits on the heat exchange equipment surfaces reduce the heat transfer coefficient, heat transfer efficiency, and lead to significant energy losses. To restore the operation design mode, such heat exchangers must be decommissioned and contaminated surfaces must be cleaned. Energy losses can be reduced if deposits on heat exchange surfaces are detected in a timely manner. The paper discusses a method for controlling deposits thickness on heat exchange surfaces. The method is based on the damping parameters analysis of the controlled product free vibrations. The research was

carried out on models of the heat exchange equipment surfaces-steel plates 400x160x2 mm, with different deposits thickness 1 During studying of the acoustic characteristics, the natural vibrations frequencies were determined tenfold with each type of plate. Signal processing occurs in a program that allows you to receive and record data from an audio device, calculate the signal amplitude spectrum in the time domain, and return it as a value and phase (receiving the frequency spectrum). The Wilcoxon rank sum was used to determine the spectrum changes dynamics. The researches have shown that the free vibrations method allows us to determine not only the presence of deposits on the heat exchange surfaces, but also their thickness.

**Key words:** hardware and software complex, deposits, heat exchange equipment, free oscillation method.

**For citation:** Garnyshova EV, Izmaylova EV, Vankov YuV. Control of thickness of deposits of heat exchange equipment by hardware and software complex. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(4):106-114. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114.

### Введение

Целью работы является оценка возможности контроля отложений на поверхностях теплообменного оборудования по параметрам свободных затухающих колебаний. Определение толщины должно выполняться с наружной стороны теплообменной поверхности в процессе эксплуатации.

В результате эксплуатации теплообменного оборудования с неудовлетворительной водоподготовкой на внутренней поверхности аппаратов происходит отложение осадка. Теплопроводность которого в десятки раз ниже теплопроводности металла [1]. Наличие даже тонкого слоя осадков приводит к резкому снижению теплопроводности, повышению температуры поверхностей нагрева. Эксплуатация конструкций в условиях перегрева снижает механическую прочность металла и как следствие ведет к повреждениям и снижению надежности системы.

Отдельно следует рассмотреть негативное влияние отложений в теплообменниках системы горячего водоснабжения. Наличие отложений приводит к существенному перерасходу топлива из-за ухудшения условий теплообмена (табл.1) и электрической энергии на перекачку теплоносителя из-за уменьшения проходного сечения и увеличения гидравлического сопротивления.

Таблица 1

Потери от накипи в системах отопления в зависимости от толщины слоя

| Толщина слоя накипи (мм)                               | 0,4      | 0,8      | 1,6       | 3,2       | 4,8       | 6,4       | 9,6       | 12,7      | 15,9      | 19,1      |
|--|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Перерасход жидкого топлива, л на 1000 л                | 40       | 70       | 110       | 180       | 270       | 380       | 480       | 600       | 740       | 900       |
| Перерасход угля, кг на 1 т.н.                          | 80       | 140      | 220       | 360       | 540       | 760       | 960       | 1200      | 1400      | 1800      |
| Перерасход газа, м <sup>3</sup> на 1000 м <sup>3</sup> | 40       | 70       | 110       | 180       | 270       | 380       | 480       | 600       | 740       | 900       |
| <b>Перерасход энергоносителя в %</b>                   | <b>4</b> | <b>7</b> | <b>11</b> | <b>18</b> | <b>27</b> | <b>38</b> | <b>48</b> | <b>60</b> | <b>74</b> | <b>90</b> |

Снизить энергетические потери можно путем своевременного контроля толщины отложений поверхностей теплообменного оборудования. Для этого необходимо иметь доступные методики и оборудование, которые позволят провести контроль в режиме реального времени.

Контролировать состояние теплообменных поверхностей в процессе эксплуатации наиболее рационально неразрушающими методами. В настоящее время для определения широкой номенклатуры свойств материалов (прочностных, упругих, пластических, вязких) широко используются акустические методы контроля [2, 3]. Они основаны на измерении физических параметров, связанных с распространением упругих волн в твердых телах. Ультразвуковые методы, используемые при дефектоскопии изделий, требуют тщательной подготовки поверхности контроля, обеспечения надежного акустического контакта поверхности и датчиков, обладают большой трудоемкостью [4-6].

Для контроля толщины отложений предлагается применить низкочастотные акустические методы, в частности метод свободных колебаний [7]. При контроле методом свободных колебаний используется слышимый диапазон частот 20 Гц–20 кГц.

Методика контроля заключается в возбуждении собственных колебаний контролируемого объекта, фиксации отклика, проведении анализа спектра собственных частот и выдачи заключения о состоянии изделия [8, 9].

Известно, что собственные колебания являются затухающими и описываются уравнением (1).

$$x(t) = A_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0) \quad (1)$$

где  $A_0$  – начальная амплитуда колебаний;  $\phi_0$  – начальная фаза;  $\omega$  – циклическая частота;  $\beta$  – коэффициент затухания колебаний.

Величины  $A_0$  и  $\phi_0$  определяются условиями возбуждения колебаний, а циклическая частота затухающих колебаний определяется по формуле (2):

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (2)$$

График затухающих колебаний представляет синусоиду (Рис. 1) с уменьшающейся с течением времени по экспоненциальному закону (3) амплитудой [10]:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\beta t} \quad (3)$$

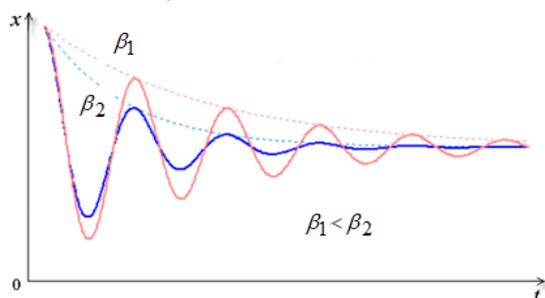


Рис. 1. Затухающие колебания

Оценку затухания колебаний по результатам экспериментов можно проводить по амплитудно-временному сигналу, по изменению амплитуд спектральных составляющих сигнала, по изменению с течением времени какого-либо критерия сравнения амплитудного спектра в начальный момент времени с последующими.

Оценка затухания колебаний по амплитудно-временному сигналу заключается в определении закона изменения огибающей графика сигнала. Другие способы связаны с анализом амплитудных спектров сигнала в разные моменты времени с начала возбуждения колебаний. В зависимости от спектрального состава сигнала при формировании спектра процедурой быстрого преобразования Фурье можно применять функции оконного взвешивания отсчетов выборки (окно Барлетта, Хэмминга и т.д.) [11, 12].

### Методы

Для проведения исследований авторами использовался аппаратно-программный комплекс, блок-схема которого представлена на Рис.2, который включает в себя устройство для контроля толщины отложений на поверхностях теплообмена (Рис. 3), состоящее из двух систем – регистрации и обработки сигналов.



Рис. 2. Блок-схема аппаратно-программного комплекса

В систему регистрации входит объект контроля, датчик и ударник. В систему обработки входит аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и компьютер.

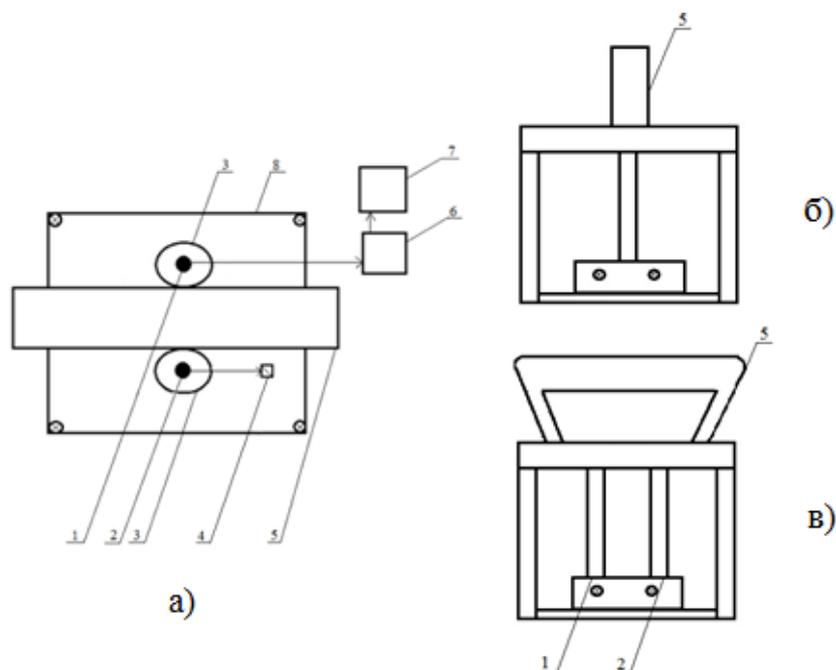


Рис. 3. Устройство для контроля для контроля толщины отложений на поверхностях теплообмена:  
а) вид сверху; б) вид сбоку; в) вид спереди

Цифрами на Рис. 3 обозначены:

- 1 – пьезоэлектрический датчик (микрофон);
- 2 – ударник;
- 3 – отверстия для крепления ударника и датчика;
- 4 – тумблер;
- 5 – ручка;
- 6 – аналого-цифровой преобразователь;
- 7 – персональный компьютер;
- 8 – корпус.

Устройство для контроля отложений на поверхностях теплообмена работает следующим образом. На корпусе находятся два отверстия, тумблер и ручка. В первом отверстии располагается ударник, во втором – пьезоэлектрический датчик, соединенный с АЦП. Корпус устройства устанавливают на первый диагностируемый участок поверхности теплообмена. Ударник возбуждает колебания на поверхности теплообмена, пьезоэлектрический датчик принимает аналоговый сигнал. Постоянство силы удара обеспечивается отведением ударника на одно и то же расстояние.

После возбуждения колебаний контролируемого изделия аналоговый сигнал с датчика поступает в АЦП, оперативную память компьютера, подвергается обработке специализированным программным обеспечением [13] и результаты фиксируются на жестком диске в виде файла отчета.

Наличие рамки прибора, ограничивающей колебания локальной области позволяет уменьшать влияние смежных областей контролируемой поверхности на результаты измерений.

В лабораторных исследованиях в качестве моделей поверхности теплообмена использовались металлические пластины длиной 400 мм, шириной 160 мм и толщиной 2 мм. Исследовались пластины без осадка и с разной толщиной отложений 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 мм.

С каждым типом пластины проводилось по десять экспериментов. По пластине наносился нормированный механический удар, записывался акустический отклик и проводился анализ его амплитудно-частотных характеристик.

#### Результаты и обсуждение

На рис.4 представлен пример амплитудно-временного сигнала и его амплитудного спектра.

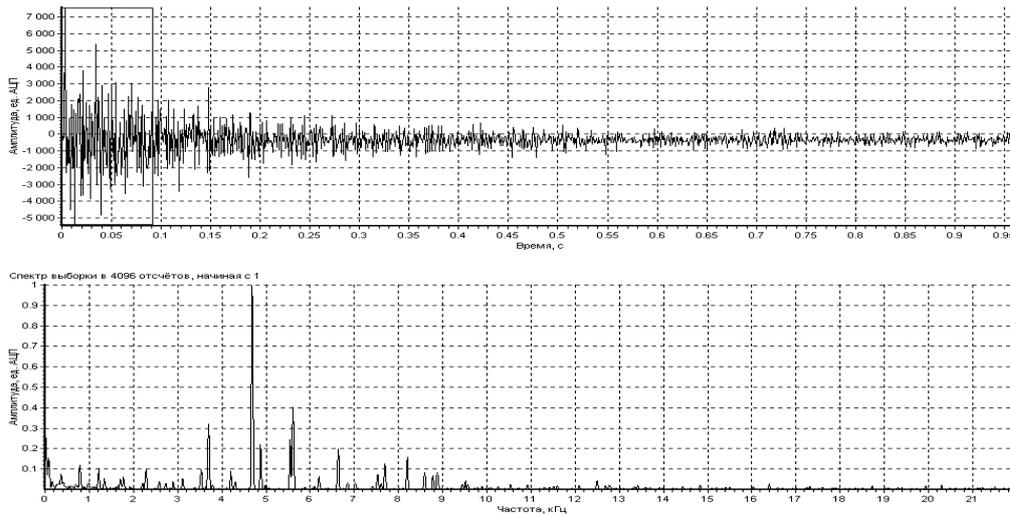


Рис. 4. Сигнал и его амплитудный спектр

На рис.5 приведены изменения амплитудных спектров сигнала с течением времени. Спектр в начальный момент времени расположен на дальнем плане, ось времени направлена к читателю.

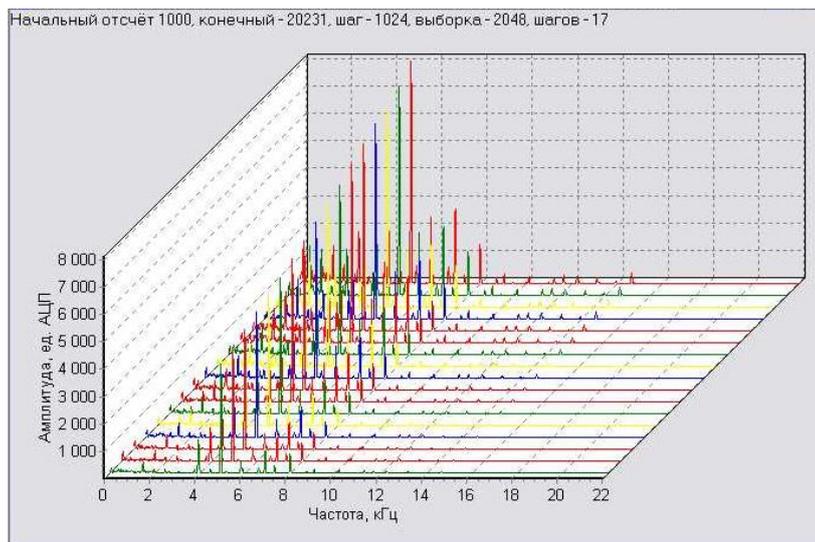


Рис. 5. Набор спектров сканирования сигнала

На рис.6 приведены текущий спектр *а*), эталонный (спектр пластины без осадка) *б*) и разница между ними.

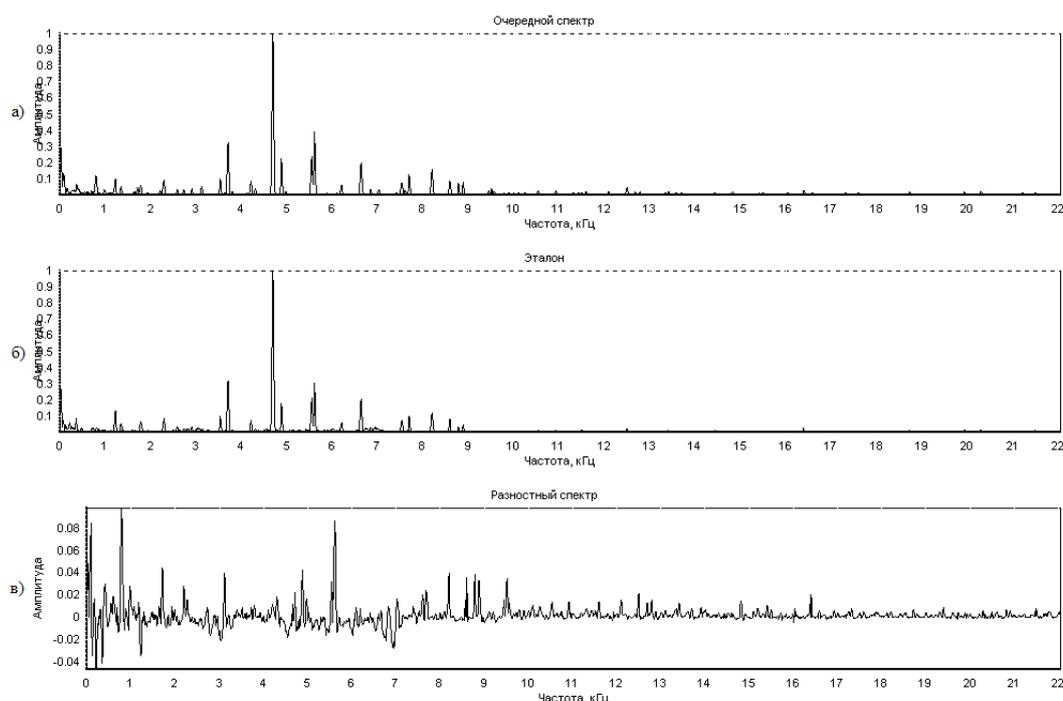


Рис. 6. Пример спектров:  
а) текущий; б) эталонный; в) разностный

Для того, чтобы уйти от возможной зависимости от силы возбуждения колебаний на амплитудные спектры при разных экспериментах, анализ спектров проводится в относительных величинах. Относительные амплитуды спектральных составляющих получаются путем их деления на амплитуду максимальной составляющей спектра.

Анализ спектров колебаний, представленных на рис. 5 и 6 показал, что в сигналах присутствуют составляющие в диапазоне до 10 кГц.

Для оценки динамики изменения всех спектральных составляющих применили ранговую сумму Уилкоксона (*Wilcoxon rank-sum test, Wilcoxon's rank sum test*).

Ранговая сумма Уилкоксона является непараметрическим критерием используемым для сравнения двух выборок по уровню количественного признака, измеренного в непрерывной или порядковой шкале. Данный метод выявления различий между выборками предложен в 1945 году Френком Уилкоксоном (*F. Wilcoxon*) [14, 15].

В разработанном программном обеспечении сравнения спектров ранговая сумма Уилкоксона вычисляется по следующему алгоритму:

- Смешиваются амплитуды эталонного и текущего спектров.
- Смесь амплитуд упорядочивается по возрастанию.

Из полученного вариационного ряда выбираются и суммируются ранги амплитуд текущего спектра. При совпадении значений амплитуд текущего и эталонного спектра к сумме прибавляется полусумма рангов этих амплитуд.

Результаты обработки спектров сканирования чистой пластины и пластин с осадком приведены в табл.2 и на рис.7. За эталонный спектр при проведении анализа брался первый спектр в каждой из каждой серии сканирования.

Таблица 2

Значения статистики Уилкоксона для спектров сканирования образцов

| № спектра сканирования | Значения статистики Уилкоксона (W) |                     |                       |                       |                       |
|------------------------|------------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                        | образец без осадка                 | толщина осадка 1 мм | толщина осадка 1,5 мм | толщина осадка 2,0 мм | толщина осадка 2,5 мм |
| 1                      | 0                                  | 0                   | 0                     | 0                     | 0                     |
| 2                      | -8,802                             | -12,414             | -14,748               | -18,594               | -20,729               |
| 3                      | -14,391                            | -21,228             | -24,453               | -25,939               | -25,599               |
| 4                      | -19,886                            | -25,038             | -28,806               | -29,79                | -29,303               |
| 5                      | -22,741                            | -28,852             | -31,341               | -32,333               | -31,245               |
| 6                      | -25,546                            | -30,608             | -32,796               | -33,885               | -32,074               |
| 7                      | -27,103                            | -32,265             | -33,316               | -35,079               | -33,501               |
| 8                      | -29,092                            | -33,286             | -34,36                | -35,736               | -34,027               |
| 9                      | -30,585                            | -33,823             | -35,181               | -36,311               | -34,944               |

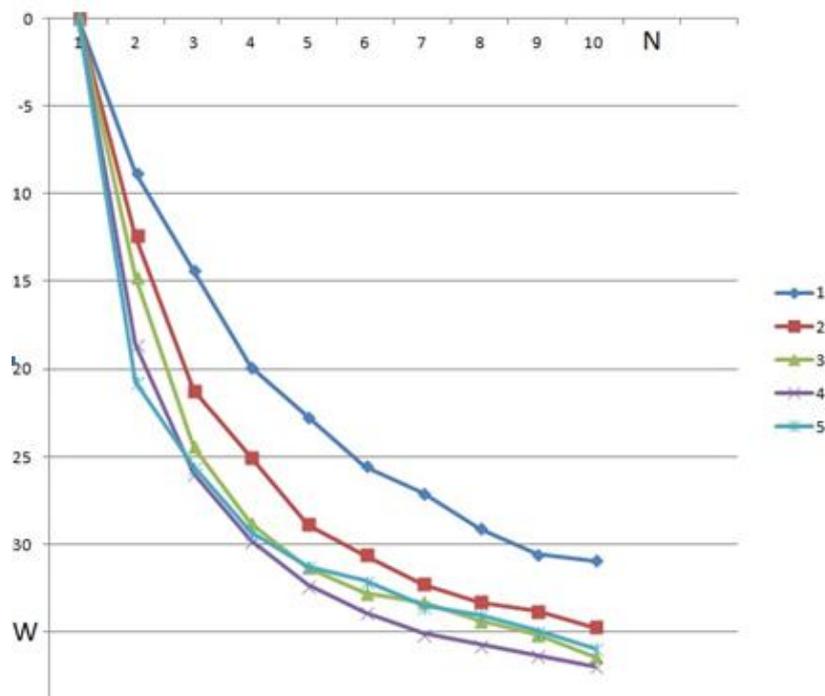


Рис. 7. Изменение статистики Уилкоксона исследуемых спектров сигналов с течением времени: 1 – Чистая пластина, 2 – толщина осадка 1,0 мм, 3 – толщина осадка 1,5 мм, 4 – толщина осадка 2,0 мм, 5 – толщина осадка 2,5 мм

Ниже представлены уравнения полиномиальной аппроксимации третьей степени с величиной достоверности аппроксимации  $R^2$  полученные в *Excel* по результатам, представленным табл. 1.

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= -0,0433x^3 + 1,1428x^2 - 11,215x + 9,8658 & R^2 &= 0,999 \\
 Y_2 &= -0,0954x^3 + 2,11934x^2 - 17,382x + 14,789 & R^2 &= 0,997 \\
 Y_3 &= -0,1437x^3 + 3,0649x^2 - 21,817x + 18,307 & R^2 &= 0,997 \\
 Y_4 &= -0,1511x^3 + 3,2118x^2 - 22,537x + 17,743 & R^2 &= 0,985 \\
 Y_5 &= -0,1698x^3 + 3,4629x^2 - 23,092x + 17,321 & R^2 &= 0,966
 \end{aligned}$$

### Заключение

Проведенные лабораторные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Метод локальных свободных колебаний позволяет обнаруживать наличие отложений на поверхностях теплообмена.
2. Наличие осадка приводит изменению частот собственных колебаний контролируемого изделия и увеличению затухания акустического отклика.
3. Для одновременной оценки изменения частот колебаний и их затухания целесообразно проводить анализ сигналов по оценке изменения их спектров с течением времени.
4. В качестве критерия сравнения спектров при обнаружении осадка на поверхностях теплообмена возможно использование ранговой суммы Уилкоксона.

Результаты полиномиальной аппроксимации третьей степени изменения статистики Уилкоксона с течением времени для исследуемых пластин показали, что предлагаемый метод позволяет обнаруживать осадок толщиной в доли миллиметра.

### Литература

1. Saifullin E.R, Vankov Y.V., Izmaylova E.V., et al. Method of assessing the thermal state of the heat transfer surfaces. Journal of Physics: Conference Series, Low-temperature Plasma during the Deposition of Functional Coatings. Сер. "Scientific Technical Conference on Low Temperature Plasma during the Deposition of Functional Coatings, LTP Coatings 2017" 2018. С. 012058.
2. Алешин Н.П. Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989.
3. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. Книга 2. Акустические методы контроля. М.: Высшая школа. 1991.
4. Vankov Yu.V., Ziganshin Sh.G., Izmailova E.V., et al. The effect of the size and position of transverse cracks in the natural frequencies of the rods. В сборнике: IOP Conference Series: Materials

Science and Engineering Сер. "International Scientific and Technical Conference "Innovative Mechanical Engineering Technologies, Equipment and Materials-2014", ISC IMETEM 2014" 2015. С. 012036.

5. Zagretdinov, A.R, Vankov, Y.V., Ivshin, I.V. The Analysis of Frequencies of Own Insulators Fluctuations for the Solution of a Problem of their Control. *Procedia Engineering*. 2016. V. 150. PP. 2334-2339. 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016, Chelyabinsk; Russian Federation; 19-20 May 2016.

6. Vankov Yu.V., Ziganshin Sh.G., Izmailova E.V, et al. Determination of the oscillation frequencies of corrosion defects finite element methods in order to develop methods of acoustic monitoring of pipelines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015.

7. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В. Контроль толщины отложений на теплообменном оборудовании // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М: МЭИ, 2019.

8. Зиганшин Ш.Г., Ваньков Ю.В., Измайлова Е.В. Контроль технического состояния трубопроводов акустическими методами. Казань: Издательство Казанского университета. 2015.

9. Ваньков Ю.В. Низкочастотные методы контроля. Метод свободных колебаний. Казань. Издательство КГЭУ, 2003.

10. Ваньков Ю.В., Яковлева Э.Р. Об одном подходе к оценке затухания колебаний. *Техническая акустика*. 2005. Т.5. С.251-265.

11. Lawrence S. *Digital spectral analysis with applications*. Marple, Jr. 2007.

12. Newland D.E. *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis: Third Edition*. 2005.

13. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615470 «2RSoundSA». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 апреля 2019.

14. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. // *Annals of Mathematical Statistics*. 1947. № 18. pp. 50-60.

15. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods // *Biometrics Bulletin* 1. 1945. pp. 80-83.

#### Авторы публикации

**Гарнышова Елена Владимировна** – магистр 2-го года обучения, Казанский государственный энергетический университет.

**Измайлова Евгения Вячеславовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

**Ваньков Юрий Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. Saifullin ER, Vankov YV, Izmaylova EV, et al. Method of assessing the thermal state of the heat transfer surfaces. *Journal of Physics: Conference Series, Low-temperature Plasma during the Deposition of Functional Coatings*. Scientific Technical Conference on Low Temperature Plasma during the Deposition of Functional Coatings, LTP Coatings 2017. 2018. С. 012058.

2. Aleshin NP. *Methods of acoustic control of metals*. Moscow: Mashinostroenie, 1989.

3. Ermolov IN, Aleshin NP, Potapov AI. *Nondestructive testing*. Book 2. Acoustic control methods. Moscow: Higher school. 1991.

4. Vankov YuV, Ziganshin ShG, Izmailova EV, et al. *The effect of the size and position of transverse cracks in the natural frequencies of the rods*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Сер. International Scientific and Technical Conference Innovative Mechanical Engineering Technologies, Equipment and Materials-2014, ISC IMETEM 2014 2015. С. 012036.

5. Zagretdinov AR, Vankov YV., Ivshin IV. *The Analysis of Frequencies of Own Insulators Fluctuations for the Solution of a Problem of their Control*. *Procedia Engineering*. 2016;150:2334-2339. 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016, Chelyabinsk; Russian Federation; 19-20 May 2016.

6. Vankov YuV, Ziganshin ShG, Izmailova EV, et al. *Determination of the oscillation frequencies of corrosion defects finite element methods in order to develop methods of acoustic monitoring of pipelines*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015.

7. Garnysheva EV, Izmailova EV. Control of thickness of deposits on heat exchange equipment proceedings Of the International scientific and technical conference. *Radioelectronics, electrical engineering and power engineering*. M: MEI, 2019.

8. Ziganshin ShG, Vankov YuV, Izmailova EV. *Control of technical condition of pipelines by acoustic methods..* Kazan: Kazan University Press. 2015.

9. Vankov YuV. *Low-Frequency control methods. Method of free oscillations*. Kazan. Publishing house of Kazan state power engineering University, 2003.

10. Vankov YuV, Yakovleva ER. On one approach to estimation of vibration damping. *Technical acoustics*. 2005;5:251-265.

11. Lawrence S. *Digital spectral analysis with applications*. Marple, Jr. 2007.

12. Newland DE. *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis: Third Edition*. 2005.

13. Izmailova EV, Vankov YuV, Garnysheva EV, et al. Certificate of state registration of the computer program N. 2019615470. 2RSound SA. Registered In the register of computer programs on April 26, 2019.

14. Mann HB, Whitney DR. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*. 1947;18:50-60.

15. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*. 1945. pp. 80-83.

### **Authors of the publication**

*Elena V. Garnyshova* – Kazan state power engineering University, Kazan, Russia.

*Evgeniya V. Izmaylova* – Kazan state power engineering University, Kazan, Russia.

*Yuri V. Vankov* – Kazan state power engineering University, Kazan, Russia.

*Поступила в редакцию*

*02 июня 2020г.*



## РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДАТЧИКА ДЛЯ ПМР-АНАЛИЗАТОРА

А.Ю. Свинин<sup>1</sup>, Р.С.Кашаев<sup>2</sup>, О.В. Козелков<sup>3</sup>

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Резюме:** Разработка средств измерений в области ядерного (протонного) магнитного резонанса является важнейшей задачей в химии, нефтехимии, медицине и других науках. Создание однородного магнитного поля зачастую определяет эффективность и точность конечных результатов измерений методом протонного магнитного резонанса, поэтому основной задачей данной работы является разработка магнитной системы Хальбаха на основе конструктивных задач и параметров проектируемого ПМР-анализатора. В данной работе описан процесс разработки и представлены результаты создания ряда основных компонентов магнитной системы датчика для проточного ПМР-анализатора. Произведён анализ различных вариантовборок магнита Хальбаха на степень однородности распределения магнитного поля, разработана и изготовлена 3D-модель магнитной сборки Хальбаха для магнитной системы датчика ПМР-анализатора с использованием редкоземельных постоянных магнитов. Описан процесс разработки и создания кварцевого генератора по схеме Пирса требуемой частоты для приёмно-передающей катушки магнитной системы датчика ПМР-анализатора. Результаты и опыт могут быть использованы для комплексного расчёта при проектировании магнитных датчиков с высокой степенью однородности магнитного поля, а также устройств, использующих в своей основе метод протонного магнитного резонанса.

**Ключевые слова:** ядерный (протонный) магнитный резонанс, приёмно-передающая катушка, магнитная система Хальбаха, ПМР-анализатор, кварцевый генератор.

**Благодарности:** Авторы благодарны кафедре Приборостроения и мехатроники Казанского государственного энергетического университета за помощь в разработке оборудования.

**Для цитирования:** Свинин А.Ю., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка магнитной системы датчика для ПМР-анализатора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4 С. 115-122. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-115-122.

## THE DEVELOPMENT OF THE MAGNETIC SYSTEM OF SENSOR FOR NMR-ANALYSER

AY. Svinin<sup>1</sup>, RS. Kashaev<sup>2</sup>, OV. Kozelkov<sup>3</sup>

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract:** The enhancement of the measuring instruments accuracy has always been the most crucial task for engineers and scientists. In particular, in the field of nuclear magnetic resonance, the creation of uniform magnetic field often defines the results of measurements, therefore the main task of this study is to develop Halbach magnet array based on design characteristics of developing NMR-analyzer. The research describes the development process of the main sensor's magnetic system components for continuous-flow portable NMR-analyzer. The scientific paper makes a different variations analysis of Halbach magnet arrays on the degree of the magnetic field homogeneity, shows the process of development and production of the 3D-framework for Halbach magnet array for NMR-analyzer. The article also gives information on the design of quartz generator based on Pierce oscillator circuit for receiver-transmitter coil of the NMR-analyzer's sensor. The results could be useful for the magnetic sensors design with high degree of homogeneity, measuring instruments and devices using the method of nuclear magnetic resonance in its foundation.

**Key words:** nuclear (proton) magnetic resonance, receiving translating coil, Halbachmagnet array, NMR-analyzer, quartz generator.

**Acknowledgments:** The authors are grateful to the Department of Instrument Engineering and Mechatronics of Kazan State Power Engineering University for support in the development of equipment.

**For citation:** Svinin AY, Kashaev RS, Kozelkov OV. The development of the magnetic system of sensor for PMR-analyser. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):115-122. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-115-122.

### Введение

Явление ядерного (протонного) магнитного резонанса (далее ПМР или ЯМР) является сегодня одним из самых информативных и перспективных методов исследования структуры и динамических изменений молекул. ПМР-спектроскопия позволяет регистрировать переходы между магнитными энергетическими уровнями атомных ядер, вызываемые радиочастотным излучением. Сфера применения ПМР расширяется с каждым годом, охватывая всё новые области применения [1], что подтверждает актуальность данной работы. Одним из самых сложных элементов ПМР-анализаторов является магнитная система датчика, от которой во многом зависит погрешность измерений [2]. Магнитная сборка Хальбаха (МСХ) [3] с дискретными магнитами, которая широко используется в построении магнитного датчика ПМР-анализаторов [4], обладает большим количеством преимуществ, однако не лишена недостатков.

Целью данной работы является разработка составных частей магнитной системы датчика разрабатываемого проточного портативного ПМР-анализатора для оперативного контроля состава жидкостей, полимеров и твёрдых веществ [5], а именно каркаса для магнитной сборки Хальбаха, эюр однородностей магнитных полей, кварцевого генератора для приемо-передающей катушки.

### Разработка каркаса для магнитной сборки Хальбаха

Магнитная сборка Хальбаха (далее МСХ) представляет собой концепцию специального построения постоянных магнитов, расположенных в пространстве в определённом порядке, с учётом полярности каждого отдельного магнита. Главная задача магнитной сборки Хальбаха – создать однородное поперечное магнитное поле внутри сборки, позволяющее использовать катушки внутри магнита [6]. Другими ее достоинствами являются хорошая помехоустойчивость и высокое значение поля. МСХ усиливает магнитное поле в её центре и поглощает внешние силовые линии поля.

Существуют несколько вариантов выполнения сборки: клиноподобные, квадратные, цилиндрические, шестиугольные конструкции и кольцевая. Далее будет рассмотрен кольцевой вариант, как доступный и конструктивно наиболее просто реализуемый из набора отдельных элементов - постоянных магнитов на редкоземельных сплавах  $NdFeB$ .

Однородность магнитного поля бесконечно длинного кольца зависит от угла  $\Phi_1$  положения центра постоянного магнита и угловой ориентации его намагниченности  $\Phi_2$ , как это показано на рис.1. Отношение между этими величинами представлено следующим уравнением (1):

$$\Phi_2 = k\Phi_1, \quad (1)$$

Если  $k = 2$ , магнитная сборка Хальбаха усиливает магнитное поле в её центре и поглощает внешние излучения как показано на рис. 1-6. В этом случае, магнитное поле в диаметре отверстия будет полностью однородным [7]. Статическое магнитное поле  $B_0$  в центре кольца представлено уравнением (2):

$$B_0 = B_r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \quad (2)$$

где  $B_0$  – магнитная индукция поля в центре;  $B_r$  – остаточная намагниченность материала (магнитов);  $r_1$  –внутренний радиус кольца;  $r_2$  – внешний радиус кольца.

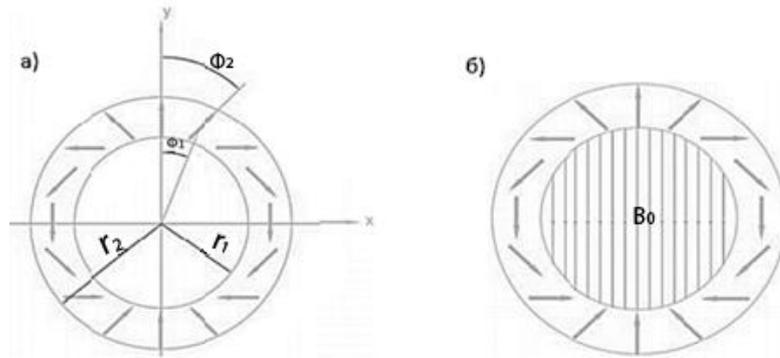


Рис. 1. Магнитная сборка Хальбаха а) сила поля в центре зависит от амплитуды намагниченности, внутреннего и внешнего радиуса кольца б) магнитная сборка Хальбаха усиливает магнитное поле в её центре и поглощает внешние излучения

При изменении коэффициента  $k$  реализуются варианты полей, показанные на рис. 2.

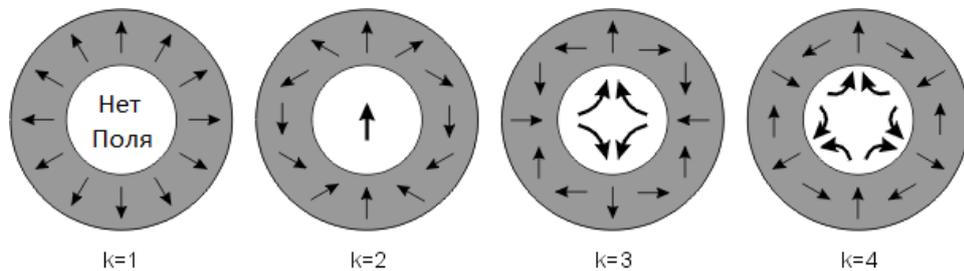


Рис. 2. Изменение магнитного поля в зависимости от изменения коэффициента  $k$

Идеальное кольцо Хальбаха показано на рис. 1-б, однако поляризовать непрерывное кольцо в соответствии с представленными направлениями полярности практически невозможно. Для того, чтобы преодолеть эту проблему было решено разделить кольцо Хальбаха на равное число идентичных постоянных магнитов с числом  $n$ .

На основе этой идеи МСХ с дискретными магнитными [8] такой вариант сборки не только унаследовал достоинства магнита Хальбаха, но также имеет ряд преимуществ: она дешевле в изготовлении и её значительно проще собрать, так как состоит из  $n$  отдельных магнитов (рис. 3-а, 3-б, 3-в).

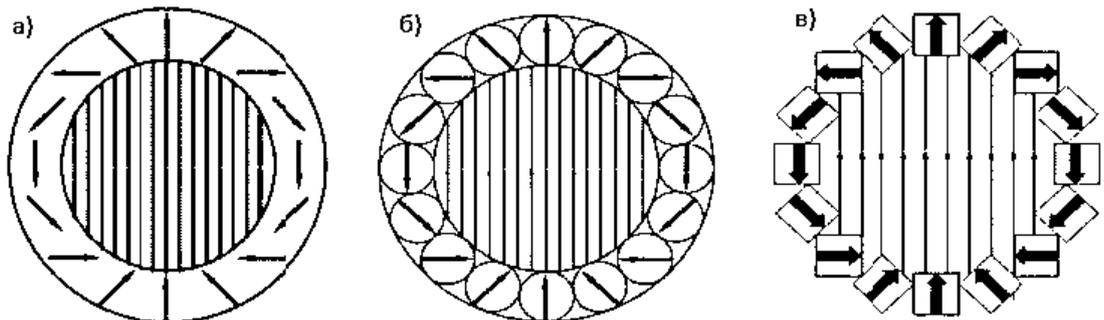


Рис. 3. Магнитная сборка Хальбаха. а) в общем виде б) с постоянными магнитами круглой формы в) с постоянными магнитами квадратной формы.

Для оценки влияния количества постоянных магнитов на однородность магнитного поля, можно рассмотреть магнитные сборки с  $n=4, 8, 16$ , и 32-я постоянными квадратными в сечении магнитами в виде параллелепипедов, расположенными как на рис. 4.

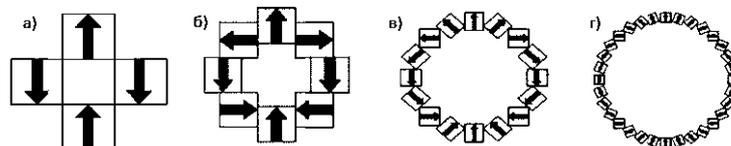


Рис. 4. Варианты магнитных сборок с разным числом  $n$  квадратных постоянных магнитов а)  $n=4$ , б)  $n=8$ , в)  $n=16$ , г)  $n=32$ .

С помощью 2D-моделирования можно оценить распределение магнитного поля внутри МСХ. В качестве исходного материала для моделирования был выбран постоянный магнит FeNdB-37 на основе сплава из редкоземельных элементов с магнитной проницаемостью  $\mu = 1,049$  и коэрцитивной силой  $H_c = 911$  кА/м.

Плотность магнитного поля симулирована в 2D, и показана на рис 5. Направление индукции магнитного поля  $B_0$  определено осью ординат. Из рис.5. наглядно прослеживается, как поле усиливается в центре и поглощается снаружи. По мере увеличения количества магнитов ( $n$ ) увеличивается и диаметр кольца МСХ и, как следствие, уменьшается сила магнитного поля в центре, но увеличивается общая однородность магнитного поля.

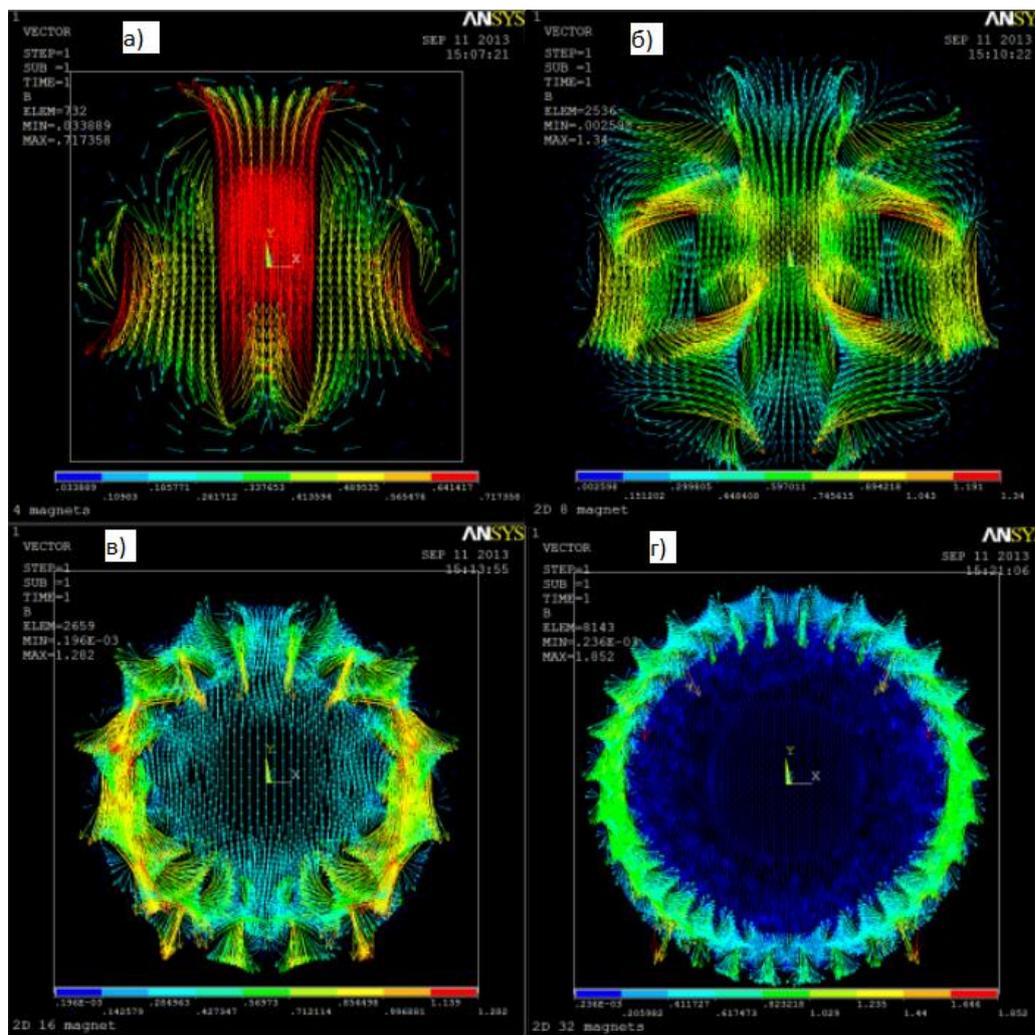


Рис. 5. Распределение плотности магнитных полей магнитных сборок с разным числом  $n$  квадратных постоянных магнитов а)  $n=4$ , б)  $n=8$ , в)  $n=16$ , г)  $n=32$

На основе анализа модели распределения магнитных полей, а также поставленных конструктивных задач было решено использовать 16 постоянных квадратных редкоземельных магнитов со стороной 5 мм.

При проектировании 3D-модели МСХ, используя формулу (1) расчета углов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , находится симметричная позиция [9] каждого отверстия (рис. 6) для расположения постоянного магнита:  $2 \cdot 22,5 = 45^\circ$ .

Каркас МСХ был изготовлен из пластика методом 3D-печати. Из-за особенности 3D-печати расстояние между зазорами не должно было превышать 1 мм, что также накладывало определенные ограничения при разработке модели. Внутренний диаметр конечной модели составил 30 мм. Внешний диаметр магнитной сборки Хальбаха составил 50 мм, ширина – 20 мм (рис 7).

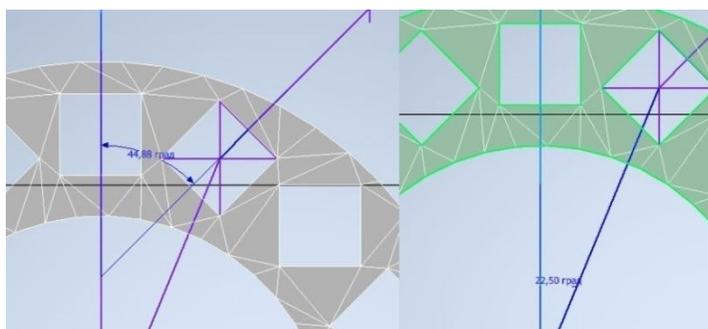


Рис. 6. Расчет положения отверстия для магнита на основе положения центра постоянного магнита и угловой ориентации его намагниченности

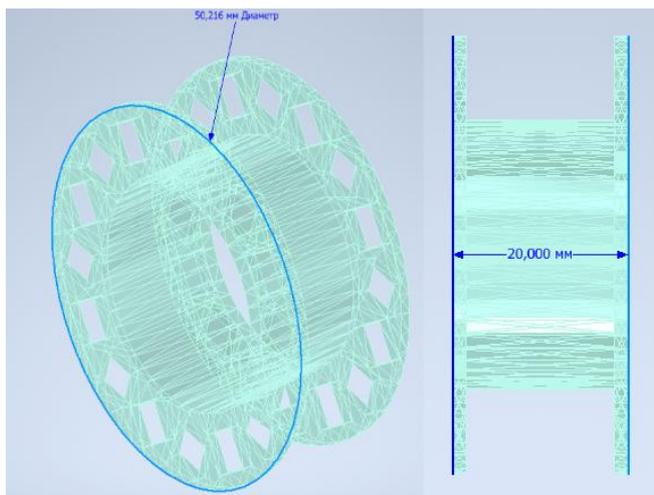


Рис. 7. 3D-модель каркаса магнитной сборки (вид со стороны и сбоку)

После 3D печати и вставки магнитов в пазы МСХ имеет вид (рис. 8). Распределение магнитного поля получившегося образца будет иметь вид, соответствующий рис. 5-в.

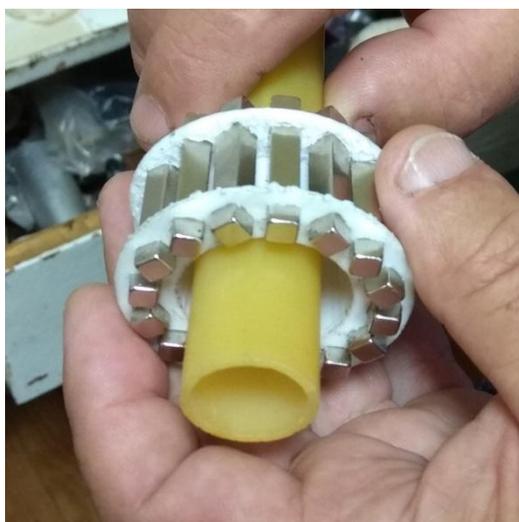


Рис. 8. Распечатанный каркас по 3D-модели со вставленными магнитами в МСХ и трубкой для потока жидкости в проточном ПМР-анализаторе

#### Разработка кварцевого генератора для прямо-передающей катушки

Портативный ПМР-релаксометр состоит из нескольких важных компонентов: магнитная система, радиочастотные катушки и электронного блока, включающего генератор резонансной частоты, генератора импульсных последовательностей, клапана, предусилителя, передатчика, приемника, АЦП, контроллера, компьютера и системы передачи информации на диспетчерский пульт [10]. Приемно-передающая катушка принимает сигнал и облучает анализируемое вещество последовательностями импульсов [11].

Переносной проточный ПМР-анализатор, в который входит ПМР-релаксометр, включает в нашем случае, также систему пробоотбора [12] и МСХ с проточным датчиком на рис.8. Магнитная система создает статическое магнитное поле  $B_0$ , которое ориентирует намагниченность  $M$  в исследуемом веществе вдоль поля [13]. Сила магнитного поля определяет уровень поляризации, следовательно, и точность измерений. Кроме того, оно определяет протонный резонанс на частоте  $\omega_0 = 2\pi\nu_0$  измерений в соответствии с формулой:

$$\omega_0 = 2\pi\nu_0 = \gamma B_0, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  – угловая радиочастота, на которой облучается образец переменным магнитным полем  $B_1$  на частоте  $\omega_0 = \pi\nu_0 = \gamma B_0$ ,  $\gamma = 4258$  Гц/Гс – гиромагнитное отношение для протонов.

Принцип построения кварцевого генератора, генерирующего сигнал на нашей резонансной частоте  $\nu_0 = 6,5$  МГц основан на ёмкостной трехточке по схеме Пирса [14] (рис. 9), в которой биполярный транзистор включен по схеме с общим эмиттером. Резисторы  $R1$  и  $R2$  задают режим работы транзистора  $T1$  по постоянному току, и выбираются исходя из тока покоя транзистора 1-5 мА в зависимости от частоты генерируемого сигнала. Для поворота фазы на  $180^\circ$  дополнительно вводятся конденсаторы  $C1$  и  $C2$ , которые будут обеспечивать возбуждение усилителя через положительную обратную связь. При возбуждении кварцевого резонатора на нечётных механических гармониках кварца включается катушка индуктивности  $L1$ . Питание кварцевого генератора может быть обеспечено разработанным на кафедре «Приборостроения и мехатроники» блоком импульсного питания для портативного ПМР-анализатора [15].

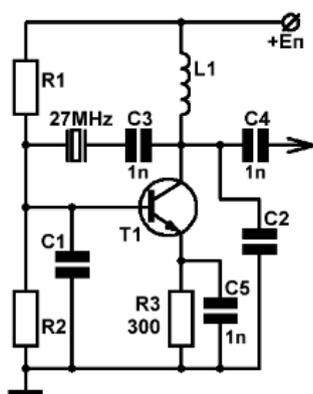


Рис. 9. Схема Пирса с выходной частотой 6,5 МГц

Разводка схемы на печатной плате имела следующий вид (рис. 10)

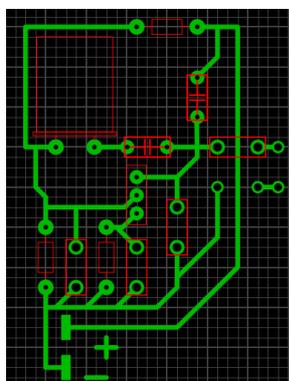


Рис. 10. Моделирование печатной платы кварцевого резонатора

Общий вид кварцевого генератора представлен на рис. 11



Рис. 11. Кварцевый генератор на 6,5 МГц после сборки

### Заключение

Был произведён анализ различных магнитных сборок Хальбаха на предмет зависимости между количеством постоянных магнитов и однородностью магнитного поля, а также рядов параметров, от которых зависит распределение магнитного поля внутри и снаружи различных вариантов магнитных сборок Хальбаха.

На основе сделанных выводов и конструктивных требований, была разработана и распечатана 3D-модель каркаса для магнитной сборки Хальбахана постоянных редкоземельных магнитах.

Построен кварцевый резонатор на радиочастоту  $\nu_0 = 6,5$  МГц для приёмо-передающей катушки датчика проточного портативного ПМР-релаксометра.

### Литература

1. Peter Blümler, Daniel Holland, John Van Duynhoven, Bruce Balcom, Eichii Fukushima, Martin Hurlimann, Anatoly Legchenko, Nan Sun, Michelle Espy, Andrew McDowell, Matthew Rosen, Bernard Blümich, William Price. Mobile NMR and MRI: developments and applications. 2015.
2. Кашаев Р.С., Свинин А. Ю., Козелков О.В. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации. Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2018. №11-12. Т.20. С .152-160.
3. Mitchell J., Gladden L.F., Chandrasekera T.C. Low-field permanent magnets for industrial process and quality control // Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy.
4. Hung Dang Phuc. Development of portable low field NMR magnet: Design and construction. Medical Imaging. INSA de Lyon, 2015. English. ffnNT: 2015ISAL0007ff. fftel-01247499f
5. Кашаев Р.С., Газизов Э.Г. Оперативный контроль компонентов битума и нефти методом ядерного магнитного резонанса при воздействии облучения в видимой инфракрасной области спектра. Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2010. № 7-8. С. 46-62.
6. Sophia Anferova., Vladimir Anferov., Juliane Arnold., et al. Improved Halbach sensor for NMR scanning of drill cores // Magnetic resonance imaging. 2007.
7. Hanspeter Raich., Peter Blümler. Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR Mandhalas // Concepts in Magnetic Resonance Part B Magnetic Resonance Engineering. 2012.23B(1).pp.16-25.
8. Bernhard Blümich., Christian Rehorn., Asaf Zia. Magnets for Small-Scale and Portable NMR: Technologies and Systems // Micro and Nano Scale NMR. 2018. pp.1-20.
9. Wentao Liu., Federico Casanova., Bernhard Blümich., et al. An Efficacious Target-Field Approach to Design Shim Coils for Halbach Magnet of Mobile NMR Sensors // Applied Magnetic Resonance. 2012.
10. Кашаев Р.С., Кубанго Б.Э. Проточные ЯМР-анализаторы для контроля скважинной жидкости, сырой нефти и нефтяных дисперсных систем. 2016.
11. Meiboom S., Gill D. // Review of Scientific Instruments. (1958).
12. Кашаев Р.С., Козелков О.В., Кубанго Б.Э. Проточные протонные магнитно-резонансные анализаторы ДЛЯ контроля скважности жидкости по ГОСТ Р 8.615-2005 ГСИ. Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2017. № 1-2. Т.19. С. 137-151.
13. Bottomley P.A. A versatile magnetic field gradient control system for NMR imaging // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1981.
14. Кварцевые генераторы на биполярных и полевых транзисторах, а также на цифровых КМОП и ТТЛ микросхемах [Электронный ресурс]. Доступно по :[https://vpyaem.ru/inf\\_genQua.html](https://vpyaem.ru/inf_genQua.html) Ссылка активна на: 20 апреля 2019.
15. Тъи Киен Нгуен, Кашаев Р.С., Козелков О.В. Импульсный блок питания для

портативного протонно-магнитного резонансного релаксометра. Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2019.

### Авторы публикации

**Свинин Андрей Юрьевич** – студент, Казанский государственный энергетический университет.

**Кашаев Рустем Султанхамитович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

**Козелков Олег Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Peter Blümler, Daniel Holland, John Van Duynhoven, et al. *Mobile NMR and MRI: developments and applications*. 2015.
2. Kashaev RS, Svinin AYu, Kozelkov OV. Minimizatsiya oshibok eksperimenta v metode PMR i vozmozhnosti polucheniya spektra vremen relaksatsii. *Izvestiya VUZ ov. Problemy energetiki*. 2018; 20(11-12):152-160.
3. Mitchell J, Gladden LF, Chandrasekera TC, et al. Low-field permanent magnets for industrial process and quality control. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*.
4. Hung Dang Phuc. Development of portable low field NMR magnet: *Design and construction. Medical Imaging*. INSA de Lyon, 2015. English. ffNNT: 2015ISAL0007ff. fftel-01247499f.
5. Kashaev RS, Gazizov EG. Operativnyi kontrol' komponentov bituma i nefi metodom yadernogo magnitnogo rezonansa pri vozdeistvii oblucheniya v vidimoi i infrakrasnoi oblasti spektra. *Izvestiya VUZov. Problemy energetiki*. 2010;7-8:46-62.
6. Sophia Anferova, Vladimir Anferov, Juliane Arnold, et al. Improved Halbach sensor for NMR scanning of drill cores. *Magnetic resonance imaging*. 2007.
7. Hanspeter Raich, Peter Blümler. Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR Mandhalas Pt B. *Concepts in Magnetic Resonance. Magnetic Resonance Engineering*. 201;23B(1):16-25.
8. Bernhard Blümich, Christian Rehorn, Asaf Zia. Magnets for Small-Scale and Portable NMR: Technologies and Systems. *Micro and Nano Scale NMR*. 2018. pp.1-20.
9. Wentao Liu, Federico Casanova, Bernhard Blümich, DonglinZu. An Efficacious Target-Field Approach to Design Shim Coils for Halbach Magnet of Mobile NMR Sensors. *Applied Magnetic Resonance*. 2012.
10. Kashaev RS, Kubango BE. *Protochnye YaMR-analizatory dlya kontrolya skvazhinnoi zhidkosti, syroi nefi i neftyanykh dispersnykh sistem*. 2016.
11. Meiboom S, Gill D. *Review of Scientific Instruments*. (1958).
12. Kashaev RS, Kozelkov OV, Kubango BE. Protochnye protonnye magnitno-rezonansnye analizatory DLYa kontrolya skvazhnosti zhidkosti po GOST R 8.615-2005 GSI. *Izvestiya VUZov. Problemy energetiki*. 2017;19(1-2)19:137-151.
- 13.. Bottomley PA. A versatile magnetic field gradient control system for NMR imaging. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1981.
14. Kwartsevye generatory na bipolyarnykh i polevykh tranzistorakh, a takzhe na tsifrovyykh KMOP i TTL mikroskhemakh [Elektronnyi resurs]. Available at: [https://vpayaem.ru/inf\\_genQua.html](https://vpayaem.ru/inf_genQua.html). Accessed to: 20 Apr 2019.
15. T'i Kien Nguen, Kashaev RS, Kozelkov OV. Impul'snyi blok pitaniya dlya portativnogo pritonno-magnitnogo rezonansnogo relaksometra. *Izvestiya VUZov. Problemy energetiki*. 2019.

### Authors of publication

**Andrei Y. Svinin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Rustem S. Kashaev** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Oleg V. Kozelkov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

02 июня 2020г.