

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА

ГЕМЕЧУ Б.Д., ШАРАПОВ В.И. Оценка энергетической эффективности гибридной гелио-геотермальной электростанции.	3
СИНЕЛЬНИКОВ Д.С., ЩИННИКОВ П.А. Повышение эффективности теплофикационных энергоблоков при разукрупнении графиков тепловых нагрузок.	12
КИСЕЛЁВ В.Г. Обратимые тепловые двигатели Филиппа и Карно с реальным газом в качестве рабочего тела.	20
МУХАМЕТОВА Л.Р., АХМЕТОВА И.Г., СТРИЕЛКОВСКИ В. Инновации в области хранения энергии.	33
МУРАТАЕВА Г.А., МУРАТАЕВ И.А. Разработка метода диагностики электроизоляционной жидкости трансформаторного электрооборудования.	41
ТИМЕРБАЕВ Н.Ф., АЛИ А.К., АЛЬМОХАММЕД О.А.М., КОРЯКИН А.Р. Моделирование влияния продольного прямоугольного оребрения на эффективность теплообмена.	48
ЮШКОВА Е.А., ЛЕБЕДЕВ В.А. Экспериментальный анализ котла посредством пинч-метода.	58
ИВАНОВА В.Р., ИВАНОВ И.Ю., НОВОКРЕЩЕНОВ В.В. Структурный и параметрический синтез алгоритмов противоаварийного управления для реализации адаптивной частотной делительной автоматики электротехнических систем.	66
ПЛОТНИКОВ Л.В., БРОДОВ Ю.М., ЖИЛКИН Б.П., ГРИГОРЬЕВ Н.И. Особенности тепломеханических характеристик пульсирующих потоков в газовоздушных трактах поршневых двигателей с турбонаддувом.	77
БОЛЬШАНИН Г.А., ПЛОТНИКОВ М.П., ШЕВЧЕНКО М.А. Экспериментальное определение параметров трёхпроводной ЛЭП.	85
СМОЛЕНЦЕВ Н.И., ЧЕТОШНИКОВА Л.М. Топология электрической сети и способ передачи электрической энергии.	95

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ВАГАПОВ Г.В. Диагностика гололеда на грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи.	104
МАЛЁВ Н.А., МУХАМЕТШИН А.И., ПОГОДИЦКИЙ О.В., ГОРОДНОВ А.Г. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов.	113

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В., ИВАНОВ Д.А., ПОТАПОВ А.А., КРОТОВ В.И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей.	123
--	-----

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

GEMECHU BD, SHARAPOV VI. Energy efficiency assessment of hybrid solar-geothermal power plant.	3
SINELNIKOV DS, SHCHINNIKOV PA. Increasing the efficiency of the thermal power units at zoning of heat load curve.	12
KISELEV VG. Reversible Carnot and Philips heat engines with a real gas as a working body.	20
MUKHAMETOVA LR, AKHMETOVA IG, STRIELKOWSKI W. Innovations in energy storage. .	33
MURATAEVA GA, MURATAEV IA. Development of diagnostics method of electrical-insulating liquid of transformer equipment.	41
TIMERBAEV NF, ALI AK, ALMOHAMMED OAM, KORYAKIN AR. Simulation of the effectiveness of longitudinal rectangular fins on the efficiency of the double pipe heat exchange.	48
YUSHKOVA EA, LEBEDEV VA. Exergy analysis of the boiler using the pinch method.	58
IVANOVA VR, IVANOV IY, NOVOKRESHCHENOV VV. Structural and parametric synthesis of anti-average control algorithms for realizing adaptive frequency operating automatics electrotechnical systems.	66
PLOTNIKOV LV, BRODOV YM, ZHILKIN BP, GRIGORIEV NI. Features of heat and mechanical characteristics of pulsating flows in gas-air paths of piston engines with turbocharging.	77
BOL'SHANIN GA, PLOTNIKOV MP, SHEVCHENKO MA. Experimental determination of the parameters of the eight-pole.	85
SMOLENTSEV NI, CHETOSHIKOVA LM. Electric network topology and method of transmission of electric energy.	95

ELECTRICAL ENGINEERING

VAGAPOV GV. Diagnostics of the ice on the strike protection wire.	104
MALEV NA, MUKHAMETSHIN AI, POGODITSKY OV, GORODNOV AG. Experimental-analytical identification of a mathematical model of a dc motor using the least squares method.	113

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING
DEVICES AND SYSTEMS

GOLENISCHEV-KUTUZOV AV, IVANOV DA, POTAPOV AA, KROTOV VI. Using contactless methods of diagnostics of high electric fields.	123
--	-----



ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОЙ ГЕЛИО-ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Б.Д. Гемечу, В.И. Шарапов

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

Резюме: В данной работе представлена оценка энергоэффективности гибридной гелио-геотермальной электростанции с учетом геотермального ресурса одной из продуктивных скважин (ТД4) и прямого солнечного излучения на геотермальном поле Тендахо (англ. Tendaho) в Эфиопии. Для оценки выработки энергии в гибридной солнечной-геотермальной электростанции разработана термодинамическая модель геотермальной электростанции с системой одноступенчатого разделения пара, интегрированной с параболическим концентратором установки солнечного нагрева. В гибридной электростанции солнечной энергии используется для перегрева геотермального пара, чтобы получить больше энергии, прежде чем он расширяется в турбине. Выполнен термодинамический анализ, основанный на принципах сохранения массы и энергии, для оценки эффективности гибридной электростанции в заданных условиях геотермального поля Тендахо. Также выполнен анализ качественного показателя, для того чтобы оценить, может ли гибридная электростанция вырабатывать больше энергии, чем две автономные электростанции, а именно солнечная и геотермальная электростанция, которые составляют гибридную электростанцию. Результаты показали, что гибридная электростанция технически и экономически превосходит две автономные электростанции. Благодаря интеграции двух энергетических ресурсов, гибридная электростанция может генерировать 7158 кВт электроэнергии, т.е. больше, чем сумма двух автономных электростанций (геотермальной и солнечной).

Ключевые слова: Эфиопия, геотермальная энергия, солнечная энергия, геотермальные поля, геотермальная разведка, параболический концентратор, Концентрированная солнечная энергия, гибридная электростанция.

Для цитирования: Гемечу Б.Д., Шарапов В.И. Оценка энергетической эффективности гибридной гелио-геотермальной электростанции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С. 3-11. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-3-11.

ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF HYBRID SOLAR-GEOTHERMAL POWER PLANT

BD. Gemechu, VI. Sharapov

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

Abstract: An assessment of the energy efficiency of a hybrid solar-geothermal power plant is performed taking into account the geothermal resource of one of the productive well (TD4) and the direct normal irradiance at Tendaho geothermal site in Ethiopia. A thermodynamic model of a single-flash geothermal plant integrated with a parabolic trough concentrated solar power system is developed to estimate the energy production in a hybrid solar-geothermal power plant. In the hybrid power plant, the parabolic trough concentrated solar power system is employed to superheat the geothermal steam in order to gain more energy before it expands in the turbine. Thermodynamic analysis, based on the principles of mass and energy conservation, was performed to assess the efficiency of the hybrid power plant at the given conditions

of Tendaho geothermal site. A figure of merit analysis was also employed to evaluate whether a hybrid power plant could produce more power than two stand-alone power plants namely the solar and geothermal power plants that constitute the hybrid power plant. Results showed that the hybrid power plant technically outperformed the two stand-alone power plants. By integrating the two energy resources, the hybrid power plant proved to generate 7158 kW of electricity which is larger than the sum of the two stand-alone power plants (geothermal and solar).

Keywords: Ethiopia, geothermal energy, solar energy, geothermal power plant, parabolic trough collector, concentrated solar power plant, hybrid powerplant, efficiency, figure of merit.

For citation: Gemechu BD, Sharapov VI. Energy efficiency assessment of hybrid solar-geothermal power plant. *Power engineering: research, equipment, technology*.2019; 21(4):3-11. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-3-11.

Введение

Человеческий вклад в глобальное потепление порождает проблему энергетической безопасности, одним из решений которой является использование существующих энергетических ресурсов и разработка экологически чистых источников энергии.

Возобновляемые источники энергии являются перспективным решением, благодаря их потенциалу, для обеспечения устойчивости и экологичности [1, 2]. В то же время каждый энергетический ресурс имеет свои преимущества и недостатки. Например, геотермальные электростанции, как правило, имеют более низкую эффективность преобразования энергии, чем обычные тепловые электростанции. Это связано со многими факторами, включая низкий потенциал геотермальной жидкости, высокое содержание неконденсируемого газа, высокие потери энергии после разделения и высокую паразитную нагрузку. На основании оценки, сделанной [3] на 94-х геотермальных электростанциях со всего мира, средняя эффективность преобразования геотермальных установок составляет 12 %. Следовательно, гибридизация таких энергетических ресурсов с более высокими энергетическими ресурсами может компенсировать недостатки геотермальной электростанции.

Цель данного исследования заключается в применении гибридной концепции комбинирования использования геотермальной энергии и гелио-энергии применительно к геотермальному полю *Tendaho*. В предлагаемой гибридной концепции геотермальный ресурс является поставщиком насыщенного пара, а солнечный ресурс позволяет перегреть геотермальный пар и, как следствие, увеличить мощность турбины гибридной системы.

Геотермальное поле *Tendaho* расположено в северо-восточной части Эфиопии, на 11°38' северной широты и 41°00' восточной долготы [4]. Оценки продуктивности двухфазных геотермальных скважин показали, что скважины *TD4*, *TD5* и *TD6* являются продуктивными (табл. 1). В дополнение к геотермальной энергии, поле также обладает значительным потенциалом солнечной энергии. Поле получает более чем 5,2 кВтч/м²/сутки [5 - 7] среднегодового прямого нормального излучения, которое делает это поле подходящим для солнечных установок с технологиями концентрированных солнечных электростанций (КСЭ) и для совместного комплексного использования солнечной и геотермальной энергии.

Таблица 1

Геотермальные энергетические ресурсы на *Tendaho* [6]

Скважины	Расход геотермальной жидкости, кг/с	Устьевое давление, бар	Энтальпия геотермальной жидкости, кДж/кг
<i>TD4</i>	50,4	14,4	1065
<i>TD5</i>	19	18	1267
<i>TD6</i>	37	5,4	975

Методы

Модель солнечной электростанции, рассмотренная в этом исследовании, состоит из параболических коллекторов, аккумулятора тепловой энергии, питательного насоса и

основных компонентов паровой электростанции: испарителя/теплообменника, турбины, конденсатора и питательного насоса [8-10].

Номинальный КПД силового цикла гелио-электростанции рассчитывается как

$$\eta_{\text{сл}} = \frac{N_{\text{сл}}}{Q_{\text{сл}}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{сл}}$ – солнечная тепловая энергия, подаваемая в силовой блок, кВт; $N_{\text{сл}}$ – валовая мощность турбины, кВт. Тепловая энергия, передаваемая пару перед турбиной, эквивалентна чистой тепловой энергии, подаваемой системой коллекторов солнечной энергии.

Чистая тепловая энергия [10], подаваемая в силовой цикл коллекторами солнечной энергии, рассчитывается как

$$\dot{Q}_{\text{сл}} = S_{\text{кл}} (I_b \eta_{\text{ор}} \cos(\varphi) - q), \quad (2)$$

где $S_{\text{кл}}$ – общая площадь солнечных коллекторов, м²; I_b – прямое перпендикулярное солнечное излучение, кВт/м²; $\eta_{\text{ор}}$ – оптическая эффективность солнечного поля; φ – угол падения солнечного излучения ($\varphi = 0^\circ$); q – общие теплотери в окружающую среду на м² общей площади коллектора.

Используя выражения 1 и 2, валовая мощность турбины $N_{\text{сл}}$, вырабатываемая концентрированной солнечной электростанцией, определяется по формуле

$$N_{\text{сл}} = S_{\text{сл}} (I_b \eta_{\text{ор}} \cos(\varphi) - q) \eta_{\text{сл}}. \quad (3)$$

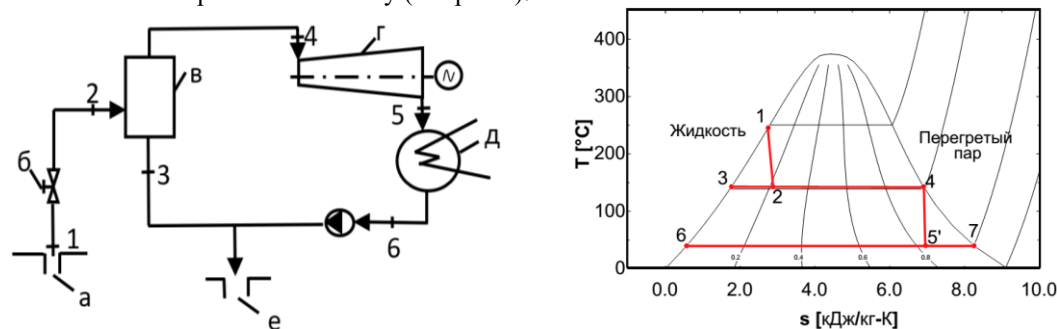
Основные исходные данные, используемые в моделировании гелио-электростанции, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные исходные данные для моделирования гелио-электростанции

Прямое солнечное излучение	216,08 Вт/м ²
Тип коллекторов	<i>EuroTough ET150</i>
Оптическая эффективность солнечного поля	0,767705
Блок турбогенератора	<i>SEGS 80</i> с сухим охлаждением
Номинальный КПД паросилового блока	0,3774

Автономная геотермальная электростанция содержит эксплуатационную скважину, из которой геотермальная жидкость направляется в сепаратор для разделения на пар и рассол; турбину, где происходит расширение пара; конденсатор, в котором отработанный пар конденсируется и направляется в нагнетательную скважину, откуда конденсат и рассол закачиваются обратно в скважину (см. рис 1).

Рис. 1. Принципиальная схема геотермальной электростанции и T – S диаграмма пара:

a – эксплуатационная скважина; b – дроссельный клапан; $в$ – сепаратор; $г$ – турбина; $д$ – конденсатор; e – нагнетательная скважина; 1 – точка при давлении устья скважины; 2 – точка на входе в сепаратор; 3 – точка при давлении разделения и $x=0$; 4 – точка на входе в турбину; 5 – точка на выходе из турбины; 5' – точка при идеальной энтальпии отработанного пара и давлении конденсации; 6 – точка на выходе из конденсатора

Массовая доля сухого насыщенного пара x в геотермальной жидкости определяется по формуле

$$x = \frac{i_2 - i_3}{i_0 - i_3}. \quad (4)$$

Расход пара D_n , кг/с, разделенного в сепараторе, рассчитывается как

$$D_n = x D_{гж}, \quad (5)$$

где i_2 – энтальпия геотермальной жидкости, кДж/кг; i_3 – энтальпия рассола, кДж/кг; i_o – энтальпия пара на входе, кДж/кг; $D_{гж}$ – расход геотермальной жидкости, кг/с.

Идеальная энтальпия отработанного пара на выходе из турбины $i_{5'}$, кДж/кг, рассчитывается по формуле [11, 12]

$$i_{5'} = i_6 + (i_7 - i_6) \cdot \left[\frac{s_4 - s_6}{s_7 - s_6} \right], \quad (6)$$

где i_6 – энтальпия отработанного пара при давлении конденсатора и сухость пара = 0, кДж/кг; i_7 – энтальпия отработанного пара при давлении конденсатора и сухость пара = 1, кДж/кг; s_4 – энтропия пара на входе в турбину, кДж/кг.К; s_6 – энтропия отработанного пара при давлении конденсатора и сухость пара = 0, кДж/кг.К; s_7 – энтропия отработанного пара при давлении конденсатора и сухость пара = 1, кДж/кг.К.

Поскольку пар на входе в турбину является насыщенным, процесс расширения происходит во влажной области. Следовательно, наличие влаги снижает изоэнтروпический КПД турбины. Этот эффект количественно определяется правилом Баумана [11], в котором говорится, что наличие 1 % средней влажности снижает изоэнтропический КПД турбины примерно на 1 %.

Учитывая правило Баумана, энтальпия отработанного пара на выходе из турбины i_o , кДж/кг, определяется по формуле

$$i_o = \frac{i_4 - 0,425(i_4 - i_{5'}) \cdot \left(1 - \frac{i_6}{i_7 - i_6} \right)}{1 + \frac{0,425(i_4 - i_{5'})}{i_7 - i_6}}. \quad (7)$$

Таким образом, мощность турбины $N_{гео}$, кВт, автономной геотермальной электростанции после расширения насыщенного пара в турбине определяется по формуле

$$N_{гео} = D_n (i_o - i_i) \cdot \eta_{эм}, \quad (8)$$

где i_i – энтальпии пара на выходе из турбины, кДж/кг; $\eta_{эм}$ – электромеханический КПД турбогенератора.

Из-за добавления солнечной энергии в геотермальную систему мы предположили 10 % валовой мощности турбины как паразитарную нагрузку для гибридной системы (нагрузку собственных нужд). Поэтому полезная электроэнергия, вырабатываемая автономной геотермальной электростанцией, рассчитывается как:

$$N_{гео} = 0,9 D_n (i_o - i_i) \eta_{эм}. \quad (9)$$

Принципиальная технологическая схема гибридной солнечной геотермальной станции [13] с солнечным перегревом пара показана на рис. 2. Гибридная установка комбинирует геотермальный энергетический цикл с системой солнечного перегрева пара, включающей в себя: перегреватель (или солнечный теплообменник), солнечный коллектор, аккумулятор для хранения и циркуляционный насос. В этой конфигурации геотермальная жидкость направляется в сепаратор, где пар отделяется от насыщенной геотермальной жидкости, далее разделенный пар попадает в блок пароперегревателя, где его температура дополнительно повышается за счет солнечной энергии. Затем тепло преобразуется, по мере расширения пара в турбинной установке, в механическую работу и, в конечном счете, – электричество. Наконец, выхлоп из турбины конденсируется при помощи воздушно-охлаждаемого конденсатора, и потом конденсат направляется в нагнетательную скважину.

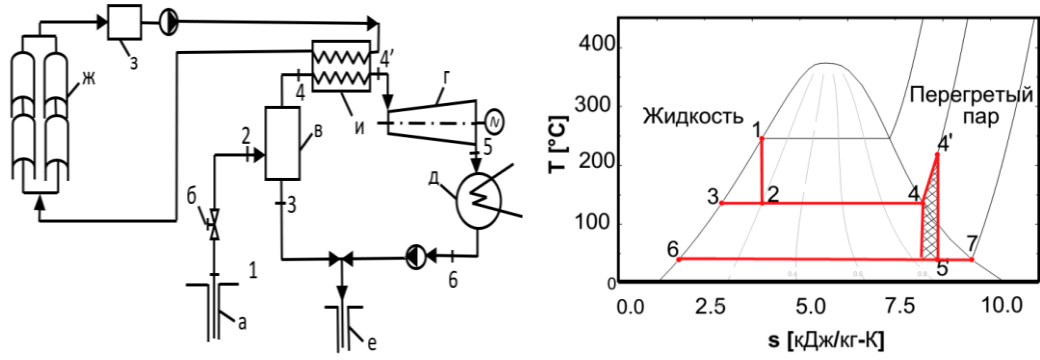


Рис. 2. Принципиальная схема и T-S диаграмма гибридной гелио-геотермальной электростанции:
 а – эксплуатационная скважина; б – дроссельный клапан; в – сепаратор; г – турбина;
 д – конденсатор; е – нагнетательная скважина; ж – коллекторы; з – аккумулятор; и – теплообменник;
 1 – точка при давлении устья скважины; 2 – точка на входе в сепаратор; 3 – точка при давлении
 разделения и $x=0$; 4 – точка на входе в теплообменник; 4' – точка на входе в турбину; 5 – точка на
 выходе из турбины; 5' – точка при идеальной энтальпии отработанного пара и давления конденсации;
 6 – точка на выходе из конденсатора

Энтальпия пара $i_o^{гб}$, кДж/кг, на входе в турбину, в гибридной системе после добавления солнечной теплоты за счет теплообменника определяется по формуле:

$$i_o^{гб} = i_o + \frac{Q_{сл}}{D_n}. \quad (10)$$

Поскольку пар на входе в турбину в гибридной системе является перегретым, алгоритм, используемый для насыщенного пара, больше не дает правильной выходной мощности. Поэтому здесь применяется подход, близкий к изложенному в работе [14]. Сначала анализируется часть процесса расширения в перегретом регионе с использованием 85 % адиабатного коэффициента. Затем, когда пар входит во влажную область, оставшееся расширение анализируется с использованием тех же уравнений, которые приведены выше (выражения 4–8). Следовательно, алгоритм EES используется, чтобы определить точку, в которой расширение пересекает кривую насыщенного пара. Основная задача заключается в поиске давления, при котором расширение пересекает кривую насыщения, применяя алгоритм до той поры, пока сухой КПД турбины не достигнет 85 %. После определения этого давления мощность турбины $N_{сух}$, кВт, для процесса расширения, который происходит в сухой области, рассчитывается как

$$N_{сух} = D_n(i_o^{гб} - i_a), \quad (11)$$

где i_a – энтальпия пара, кДж/кг, при давлении, при котором процесс расширения пересекает кривую насыщения, а сухость пара равна 1.

Энтальпия актуального отработанного пара на выходе из турбины $i_i^{гб}$ рассчитывается с использованием выражений (6) и (7), только вместо точки 4 используется точка а. Поэтому мощность турбины $N_{влж}$, кВт, для процесса расширения, происходящего во влажной области, рассчитывается как

$$N_{влж} = D_n(i_a - i_i^{гб}). \quad (12)$$

Таким образом, полная мощность турбины $N_{гб}$, кВт, в гибридной системе рассчитывается как сумма выходной мощности турбины в сухой и влажной областях. Следовательно, $N_{гб}$ определяется по формуле

$$N_{гб} = D_n(i_o^{гб} - i_a) + D_n(i_a - i_i^{гб}) = D_n(i_o^{гб} - i_i^{гб}). \quad (13)$$

Дополнительная мощность $N_{сл/гб}$, кВт, вырабатываемая за счет солнечной энергии, добавленной в гибридную энергосистему, представляет собой разницу мощностей гибридной электростанции и автономной геотермальной электростанции:

$$N_{сл/гб} = N_{гб} - N_{гео}. \quad (14)$$

Прирост мощности турбины гибридной электростанции за каждые 1000 кВт добавленной солнечной энергии определяется по формуле

$$\Delta N = \left(\frac{N_{ГБ} - N_{Гео}}{N_{Гео}} \right) \times \left(\frac{1000}{Q_{сл}} \right) \times 100\% . \quad (15)$$

При гибридизации солнечной и геотермальной энергий крайне важно выяснить реальный прирост производства электроэнергии, который может быть получен из тепловой энергии, добавленной в гибридную энергосистему, относительно электроэнергии, которая может быть произведена от такого же количества тепловой энергии в автономной солнечной электростанции. Это помогает определить, насколько выгодно добавить другой энергетический ресурс, чем использовать самостоятельный ресурс. Это увеличение мощности рассчитывается как

$$F = \left(\frac{N_{сл/ГБ} - N_{сл}}{N_{сл}} \right) \times 100\% , \quad (16)$$

где $N_{сл/ГБ}$ прирост мощности турбины гибридной электростанции за счет добавления солнечной энергии, кВт.

Значение F меньше нуля показывает, что гибридная система производит меньше электроэнергии, чем может быть произведено автономной электростанцией КСЭ, а F больше нуля означает, что гибридная система производит больше электроэнергии, чем автономная электростанция КСЭ, используя то же количество тепловой энергии.

Оценка качественного показателя – эта общая методология, используемая для оценки того, может ли гибридная электростанция производить больше электроэнергии, чем две автономные электростанции. Как определено в [15], качественный показатель $F_{тех}$ – это отношение выходной мощности гибридной электростанции к сумме выходных мощностей автономных электростанций:

$$F_{тех} = \frac{N_{ГБ}}{N_{Гео} + N_{сл}} . \quad (17)$$

В этом определении качественный показатель больше 1 указывает на то, что гибридная система превосходит автономные системы с точки зрения выработки электроэнергии. Основные исходные данные, используемые для оценки, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Основные исходные данные, используемые для оценки эффективности геотермальной и гибридной гелио-геотермальной электростанций

Энтальпия геотермальной жидкости при давлении в устье скважины $i_{ГЖ}$, кДж/кг	1065
Расход геотермальной жидкости $D_{ГЖ}$, кг/с	50,4
Температура разделения, T_c , °C	143
Температура на выходе из турбины T_o , °C	40
Электромеханический КПД турбогенератора $\eta_{эм}$	0,98

Результаты и обсуждение

Термодинамический анализ для автономной геотермальной электростанции показывает, что при исходных данных мощность турбины оказалась равной 5116 кВт с массовым расходом пара 10,93 кг/с. Однако по мере увеличения количества тепловой энергии от гелиоисточника мощность, производимая гибридной энергосистемой, увеличивается (рис. 4). Увеличение выработки электроэнергии на каждые 1000 кВт тепловой энергии, добавленной в гибридной системе, составило около 411,3 кВт.

Другими словами, процент прироста мощности турбины геотермальной электростанции на каждый 1 МВт добавленной солнечной энергии составляет около 8 %.

Несмотря на то, что этот результат дает информацию о том, какие мощности можно генерировать с использованием гибридной системы, он не предоставляет никакой информации об ее конкурентоспособности по сравнению с двумя автономными геотермальными и солнечными электростанциями.

Результаты анализов для гелио-электростанции и гибридной гелио-геотермальной электростанции

Тепловая энергия, кВт	Мощность гелио-электростанции, кВт	Мощность турбины гибридной гелио-геотермальной ЭС, кВт
0	0	5116*
2000	754,8	5924
3000	1132,2	6336
4000	1509,6	6748
5000	1887	7158
* Этот результат предназначен для автономной геотермальной электростанции		

Затем такая оценка была проведена с использованием показателя оценки по уравнению (17) – $F_{\text{тех}}$ (рис.3). Как видно из рис. 3, технический качественный показатель больше 1, это означает, что мощность гибридной электростанции больше суммы мощностей гелио-электростанции и автономной геотермальной электростанции. Значение $F_{\text{тех}}$ увеличивается по мере увеличения количества тепловой энергии от гелиоисточника.

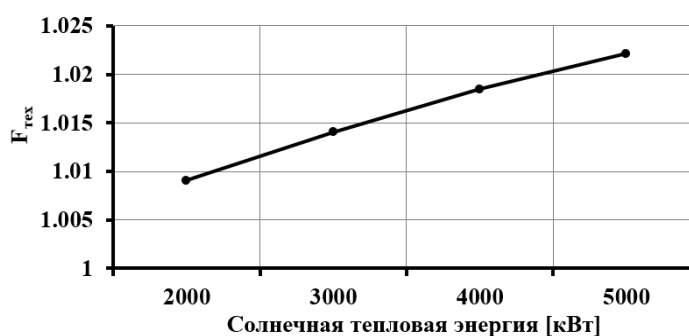


Рис. 3 Качественный показатель в зависимости от тепловой энергии, добавленной в гибридной системе

Анализ также показывает (см. рис. 4), что для такого же количества используемой тепловой энергии дополнительная электроэнергия, вырабатываемая гибридной системой, больше, чем электроэнергия, вырабатываемая автономной гелио-электростанцией.

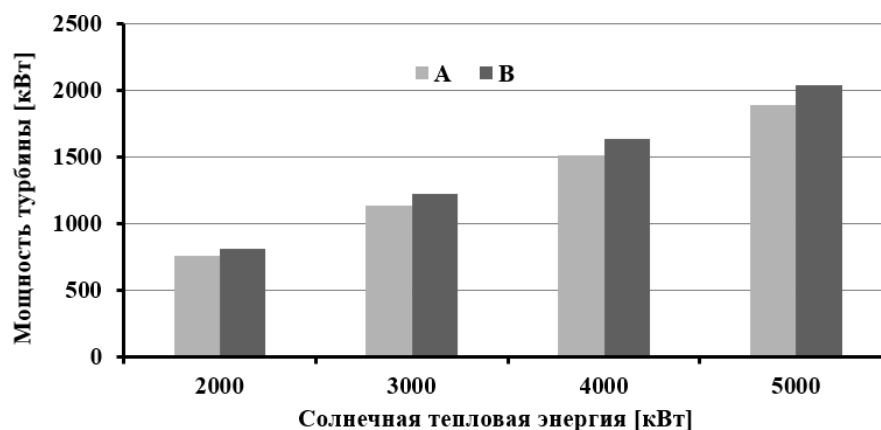


Рис. 4. Дополнительная мощность (B), вырабатываемая за счет солнечной энергии, добавленной в гибридную электростанцию, по отношению к мощности (A), вырабатываемой гелио-электростанцией, с использованием того же количества солнечной тепловой энергии

Выводы

Эфиопия обладает значительным потенциалом для использования возобновляемых источников энергии, особенно солнечной и геотермальной энергии. Учитывая наличие солнечной энергии на геотермальном поле *Tendaho* и ограничения, связанные с использованием насыщенного пара для геотермальной энергии, предлагается концепция объединения солнечных и геотермальных источников энергии в гибридной электростанции.

В гибридной гелио-геотермальной электростанции, представленной в этой статье, рассмотрена геотермальная установка с применением гелиоисточника для перегрева пара. Благодаря перегреву пара максимальная температура рабочего тела гибридной системы увеличивается, и турбина работает с перегретым паром, в отличие от расширения насыщенного пара в автономной геотермальной электростанции.

Установлено, что гибридная электростанция, благодаря добавлению солнечной энергии, позволяет производить на 8 % больше энергии, чем автономные геотермальная и солнечная электростанции. Концепция гибридизации солнечной и геотермальной энергий представляет собой интересную перспективу для рынка электроэнергии Эфиопии с потенциалом обеспечения базисной электроэнергетической нагрузки с высоким коэффициентом мощности от экологически чистых энергетических ресурсов.

Литература

1. Шарапов В.И. О месте альтернативных источников энергии в отечественной энергетике // Сантехника Отопление Кондиционирование. 2019. № 2. С. 78 - 81
2. Дубровская Е.С. Экономические особенности использования возобновляемых источников энергии в России // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 44-2. С. 44 - 46
3. Sadiq J. Zarrouk, Hyungsul Moon Efficiency of Geothermal Power Plants: A Worldwide Review // Geothermics. V. 51, July 2014. pp. 142-153.
4. Гемечу Б.Д., Шарапов В.И. Перспективы использования природных энергетических ресурсов в Эфиопии // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 1(811). С. 33-37.
5. Гемечу Б. Д., Шарапов В.И. Оценка потенциала солнечной энергии в районах геотермальных источников Эфиопии // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Седьмая международная научно-техническая конференция 21-22 апреля 2017 г. Сборник научных трудов. Ульяновск: УлГТУ. 2017. Т. 2. С. 101-105.
6. Akalewold S. Evaluation of Recent Temperature and Pressure Data from Wells in Tendaho Geothermal Field, Ethiopia and From Well Hg-1 At Hágöngur, Iceland // United Nation University Geothermal Energy Program. 2004.
7. Christoph S., Richard M. and Franz T. High Resolution Solar Radiation Assessment for Ethiopia// Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), 2004.
8. Nishith B. Desai, Santanu Bandyopadhyay Optimization of concentrating solar thermal power plant based on parabolic trough collector // Journal of Cleaner Production. 2015. V.89. pp. 262-271.
9. L.Salgado Conrado, A. Rodriguez-Pulido, G. Calderón Thermal performance of parabolic trough solar collectors // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V. 67.pp.1345-1359.
10. Morin G., Dersch J., Platzer W., Eck M., Haberle A. Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants // Solar Energy. 2012. № 86. pp. 1-12.
11. DiPippo R. Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact. 3rd ed. Massachusetts: Elsevier, 2012. 600 с.
12. Алхасов А.Б. Использование геотермальной энергии для выработки электроэнергии // Известия российской академии наук. Энергетика. 2010. № 1. С 59 – 72 .
13. Шарапов В.И., Гемечу Б.Д. Патент № 186091 (RU). МПК F24T 50/00. Геотермальная энергетическая установка. Бюл. 2019. № 1. 29.12.2018.
14. Шарапов В.И. Методика оценки энергетической эффективности структурных изменений в тепловых схемах ТЭС // Труды Академэнерго. 2015. № 2. С.27-37.
15. Cheng Z., Elham D., Behdad M. Figure of Merit Analysis of a Hybrid Solar-Geothermal Power Plant // Engineering. 2013. №5. pp. 26-31.

Авторы публикации

Гемечу Биням Демиссие – аспирант Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). Email benioni@gmail.com.

Шарапов Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). Email vlad-sharapov2008@yandex.ru.

References

1. Sharapov VI. O meste al'ternativnykh istochnikov energii v otechestvennoy energetike. *Santekhnika Otopleniye Konditsionirovaniye*. 2019;2:78 – 81.

2. Dubrovskaya YeS. Ekonomicheskiye osobennosti ispol'zovaniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii v Rossii. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2018;44(2):44 - 46.
3. Sadiq J. Zarrouk, Hyungsul Moon Efficiency of Geothermal Power Plants: A Worldwide Review. *Geothermics* 2014;51:142-153.
4. Gemechu BD., Sharapov VI. Perspektivy ispol'zovaniya prirodnnykh energeticheskikh resursov v Efiopii. *Energysaving and Watertreatment*. 2018;1(811):33-37.
5. Gemechu BD., Sharapov VI. Otsenka potentsiala solnechnoy energii v rayonakh geotermal'nykh istochnikov Efiopii. *Energoberezhniye v gorodskom khozyaystve, energetike, promyshlennosti: 7 mezhdunarodnaya nauchnotekhnicheskaya konferentsiya*. 21-22 Apr 2017. pp.101-105.
6. Akalewold S. Evaluation of Recent Temperature and Pressure Data from Wells in Tendaho Geothermal Field, Ethiopia and From Well Hg1 At Hågöngur, Iceland . *United Nation University Geothermal Energy Program*. 2004.
7. Christoph S., Richard M. and Franz T. High Resolution Solar Radiation Assessment for Ethiopia. *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*, 2004.
8. Nishith B. Desai, Santanu Bandyopadhyay Optimization of concentrating solar thermal power plant based on parabolic trough collector. *Journal of Cleaner Production*. 2015;89:262-271.
9. L.Salgado Conrado, A. Rodriguez-Pulido, G. Calderón Thermal performance of parabolic trough solar collectors . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;67:1345-1359
10. Morin G., Dersch J., Platzer W., Eck M., Haberle A. Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants . *Solar Energy*. 2012;86:1-12.
11. DiPippo R. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. 3rd ed. Massachusetts: Elsevier, 2012. P .600.
12. Alkhasov AB. Ispol'zovaniye geotermal'noy energii dlya vyrabotki elektroenergii .*Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2010;1:59-72.
13. Sharapov VI., Gemechu BD. Geotermal'naya energeticheskaya ustanovka Patent № 186091 (RU). MPK F24T 50/00. Byul. № 1. 29.12.2018
14. Sharapov V.I. Metodika otsenki energeticheskoy effektivnosti strukturnykh izmeneniy v teplovykh skhemakh TES .*Transactions of Academenergo*. 2015;2:27-37.
15. Cheng Z., Elham D., Behdad M. Figure of Merit Analysis of a Hybrid Solar-Geothermal Power Plant. *Engineering*. 2013;5:26-31.

Authors of the publication

Biniyam D. Gemechu – Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia Email benioni@gmail.com.

Vladimir I. Sharapov – Ulyanovsk State Technical University. Email vlad-sharapov2008@yandex.ru.

Поступила в редакцию

04 июня 2019 г.



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ ПРИ РАЗУКРУПНЕНИИ ГРАФИКОВ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

Д.С. Синельников*, П.А. Щинников

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1401-8781>, Sinelnikovden@hotmail.com

Резюме: В статье рассматривается работа теплофикационных энергоблоков ТЭЦ в условиях разукрупнения графика тепловых нагрузок. Показано, что для повышения эффективности может использоваться оригинальная методика разбиения температурного графика на три зоны, каждая из которых характеризуется способом регулирования отпуска теплоты, а для оценки эффекта использоваться критерий минимального расхода топлива. Разработан метод определения эквивалентной расчетной температуры, который учитывает режимные особенности теплофикационных энергоблоков в виде способа регулирования отпуска теплоты. Показано, что при зонировании температурного графика следует иметь три расчетных точки. На основании оптимизационных расчетов для теплофикационных энергоблоков стандартных типоразмеров широкой линейки мощностей показано, что оптимальные параметры теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика в целом соответствуют стандартным значениям. Кроме того, показано, что в каждой зоне температурного графика наблюдается экономия топлива, которая может составить от 3 до 30% в зависимости от типа энергоблока, его мощности и зоны температурного графика, а годовой расход топлива теплофикационными энергоблоками может быть снижен приблизительно на 10%.

Ключевые слова: зонирование температурного графика, оптимизация параметров, эффективность, теплофикация, экономия, эксергетический метод, анализ, комбинированная система, тепловые электрические станции, распределенная генерация.

Для цитирования: Синельников Д.С., Щинников П.А. Повышение эффективности теплофикационных энергоблоков при разукрупнении графиков тепловых нагрузок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С.12-19. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-12-19.

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE THERMAL POWER UNITS AT ZONING OF HEAT LOAD CURVE

DS. Sinelnikov, PA. Shchinnikov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1401-8781>, Sinelnikovden@hotmail.com

Abstract: The article deals with the work of heat and power units of thermal power plants in the conditions of disaggregation of the heat load schedule. The purpose of the work is to increase the efficiency of operation of CHP units operating under the conditions of the zoned temperature schedule. To achieve the obtained results, mathematical modeling based on the methods of differential-exergetic and thermodynamic analysis; methods of material, energy and exergetic balances. Research has shown that in order to increase the efficiency the original method of splitting the temperature graph into three zones can be used, each of which is characterized by the method of regulation of heat supply, and to assess the effect of the minimum fuel consumption criterion can be used. The method of determining the equivalent design temperature, which takes into account the regime peculiarities of heat and power units in the form of a method of regulation of heat supply, is developed. Study has shown that three design points should be available when zoning the temperature schedule. Based on optimization calculations for standard sizes of heat and power units of a wide range of capacities, the calculations show that the optimal parameters of heat and power units in the conditions of zoning of the temperature schedule as a whole

correspond to the standard values. In addition, it is shown that in each zone of the temperature schedule there is a saving of fuel, which can be from 3 to 30% depending on the type of power unit, its capacity and zone of the temperature schedule, and the annual fuel consumption of the heat and power units can be reduced by approximately 10%. It is shown that when conventional power units operate according to the zoned temperature schedule and in the first zone (quantitative regulation), preference should be given to power units with steam production. In the second zone (mixed regulation), the operation of power units with steam extraction and heat and power units is equivalent. In addition, in the third zone (qualitative regulation) preference should accrue to heat and power units.

Keywords: heat load curve, optimization of parameters, efficiency, heating, saving, exergetic method, analysis, combined system, thermal power plants, distributed generation.

For citation: Sinelnikov DS, Shchinnikov PA. Increasing the efficiency of the thermal power units at zoning of heat load curve. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):12-19. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-12-19.

Введение

Современная энергетика развивается по пути децентрализации, когда большое количество генерирующих источников, как правило, малой мощности, устанавливают рядом с потребителем [1]. В этих условиях традиционные теплоцентрали теряют своего потребителя, а их экономичность ухудшается из-за снижения выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Другими словами, ТЭЦ начинает терять свое основное преимущество – комбинированную выработку тепловой и электрической энергии. Для преодоления этих сложностей предложены комбинированные системы теплоснабжения, когда в общем случае имеется два источника, генерирующих теплоту (рис. 1). Указанные источники принято называть центральным и удаленным. Роль центрального источника выполняет традиционная ТЭЦ, а в качестве удаленного источника может выступать ДВС, ГТУ, внутриквартальные мини-ТЭС, котельные, тепловые насосы и другие установки.

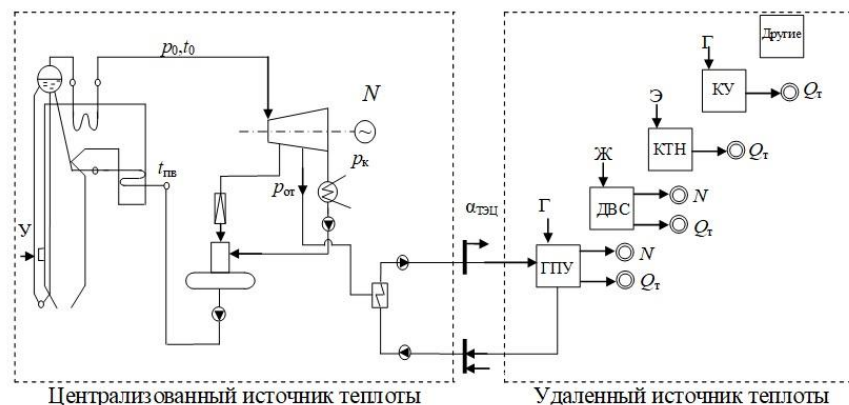


Рис. 1. Тепловая схема ТЭЦ с комбинированной системой теплоснабжения: N , Q_t – потребители электрической и тепловой энергии соответственно; $У$, $Г$, $Ж$, $Э$ – первичный энергетический ресурс в виде угля, газа, жидкого топлива и электроэнергии соответственно; $КУ$ – котельная установка; $ГТУ$ – газотурбинная установка; $КТН$ – компрессионный тепловой насос; $АТН$ – абсорбционный тепловой насос; p_0 , t_0 , p_k , $t_{пв}$, $p_{от}$, $\alpha_{ТЭЦ}$ – параметры, характеризующие работу ТЭЦ

В целом энергоснабжение потребителей от ТЭЦ по комбинированной системе рис. 1 имеет ряд преимуществ перед системами энергоснабжения потребителей традиционных ТЭЦ [2–4]. Эти преимущества, как правило, не реализованы сегодня из-за вопросов собственности. Потребители стремятся обособиться от централизованной системы с целью получения независимости, надёжности энергоснабжения и в надежде на экономическую выгоду. Последней часто не удается достигнуть из-за балансовой несовместимости потребления и генерации малыми энергоустановками двух и более видов продукции.

С другой стороны, централизованные энергоблоки теряют свои традиционные преимущества, так как работают в условиях разукрупнения графиков тепловых нагрузок. Для выявления фактических условий работы действующих и перспективных теплофикационных энергоблоков предлагается обеспечить зонирование теплового графика с одновременным отказом от традиционного регулирования отпуска теплоты от

ТЭЦ. В этом случае стандартный температурный график 150/70 °С имеет три ярко выраженные зоны (периоды), которые характеризуют разные способы регулирования (рис. 2).

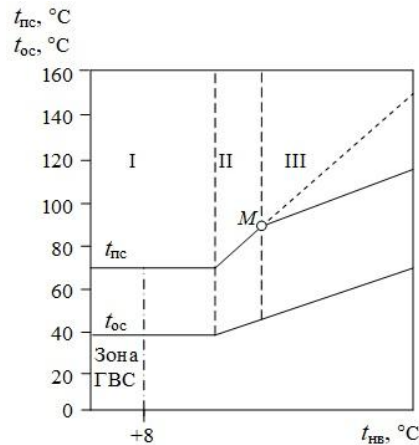


Рис. 2. Зонированный отопительно-бытовой температурный график 150/70 °С:

$t_{пс}$, $t_{ос}$, $t_{нв}$ — температура прямой, обратной сетевой воды и наружного воздуха соответственно;

M — точка максимальной теплофикационной нагрузки отбора турбины; ГВС — зона обеспечения горячего водоснабжения; +8 — температура начала отопительного сезона

Период I отвечает за режим горячего теплоснабжения (ГВС) и начало отопительного сезона и характеризуется количественным способом регулирования. При этом способе увеличение количества отпускаемой тепловой энергии обеспечивается увеличением расхода при неизменной температуре прямой сетевой воды ($t_{пс}$). Период III начинается в точке максимальной теплофикационной нагрузки (точка M , рис. 2), обеспечивает отопительную нагрузку и характеризуется качественным регулированием, при котором увеличение количества отпускаемой теплоты обеспечивается увеличением температуры за счет увеличения давления в регулируемом отборе турбины. Одновременно с началом периода III вступает в работу пиковый водогрейный котел (ПВК) в стандартных схемах теплоснабжения ТЭЦ-ПВК-МТ-П (здесь МТ — магистральная теплосеть; П — потребитель теплоты). Коэффициент теплофикации становится меньше единицы ($\alpha_{ТЭЦ} < 1$).

Период II является переходным от количественного регулирования к качественному, но одновременно этот период характеризует работу ТЭЦ в наиболее эффективном режиме, так как отопительная нагрузка уже подключена, а коэффициент теплофикации равен единице ($\alpha_{ТЭЦ} = 1$). В этом смысле зону II графика (рис. 2) можно считать базовой. Для регулирования отпуска теплоты в этой зоне предлагается применять качественно-количественный способ, когда задействованы и расход сетевой воды, и температура отборного пара. Указанный принцип зонирования впервые предложен в работах ульяновской школы энергетиков [5–7].

Материалы и методы

Для комбинированной системы отпуска теплоты задача выгодного сочетания всех ее элементов может быть представлена как минимизация суммарного расхода топлива:

$$B_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Этот показатель может являться критерием оптимизации рационального сочетания установок разного типа, работающих в комбинированной системе теплоснабжения [7–10, 11]. Частным случаем является задача оптимизации параметров энергоблоков ТЭЦ в условиях разукрупнения и зонирования температурного графика, которая формулируется следующим образом [11]:

$$\min B(\omega)_i | \varphi(\omega)_i \leq C_e \quad (2)$$

В этом выражении B — расход топлива энергоблоком; $\omega = \{X, Y\}$ — множество оптимизируемых (X) и функционально зависимых (Y) параметров; $\varphi(\omega)$ — оператор функциональных отношений (оператор преобразования); C_e — комплекс ограничений; i — характеризует зону температурного графика.

При решении задачи оптимизации параметров действующих теплофикационных энергоблоков к оптимизируемым параметрам следует отнести давление и температуру острого пара (p_0 ; t_0), температуру питательной воды ($t_{пв}$), температуру промперегрева ($t_{пп}$), коэффициент теплофикации ($\alpha_{ТЭЦ}$), рис. 1. При этом давление в регулируемом отборе ($p_{от}$)

обусловлено соответствующей зоной температурного графика, а давление конденсации (p_k) – температурой окружающей среды. Ограничениями выступают технически достижимые значения параметров в условиях реальной эксплуатации энергоблоков, с одной стороны, и ограничения на применяемые математические методы – с другой [5, 12].

Далее к рассмотрению приняты теплофикационные энергоблоки стандартных типоразмеров, серийно выпускаемые отечественной промышленностью: типа Т и ПТ в диапазоне мощностей от 30 до 265 МВт. Для них с использованием режимных карт сформированы исходные данные для оптимизационных расчетов по обеспечению эквивалентных нагрузок [13] в условиях зонирования температурного графика. Для турбин типа ПТ производственный отбор задействован во всех случаях (табл. 1).

Таблица 1

Параметры нагрузок тепловой, электрической и производственного отбора для теплофикационных турбин в условиях зонирования температурного графика

Турбина	Параметры пром. отбора		Зоны температурного графика					
			I		II		III	
	G, т/ч	P, бар	Q, МВт	N, МВт	Q, МВт	N, МВт	Q, МВт	N, МВт
T-50	-	-	17	50	87	38	116	40
T-110	-	-	30	110	152	83	203	88
T-120	-	-	33	120	164	90	218	96
T-175	-	-	48	175	240	131	320	140
T-180	-	-	49	180	240	135	320	144
T-250	-	-	61	250	305	188	407	200
T-265	-	-	63	265	314	199	418	212
ПТ-30	83	0,9	11	30	55	22,5	73	22,5
ПТ-50	118	1,0	10	50	49	38	65	38
ПТ-65	250	1,6	15	65	75	49	100	49
ПТ-80	180	1,2	17	80	87	60	116	60
ПТ 135	324	1,2	21	135	105	101	140	101

Обсуждение результатов

Для температурного графика 150/70 С расчеты показывают, что для зон II и III (рис. 3) оптимальные параметры (p_0 ; t_0 ; $t_{пв}$) в целом соответствуют стандартным значениям при некотором снижении оптимальной температуры острого пара (до ~510 °С). Снижение температуры острого пара обусловлено достаточно высокой термодинамической эффективностью комбинированной выработки электроэнергии и теплоты. Подобное снижение оптимальной температуры острого пара наблюдалось в работах [4, 14, 15] для других технологий и способов повышения эффективности энергоблоков ТЭЦ. Скачкообразный переход давления острого пара p_0 в области единичных мощностей 180 МВт во всех случаях связан с переходом на энергоблоки с промежуточным перегревом пара. Этот переход обуславливает также и более развитую систему регенерации, а следовательно – температуру питательной воды ($t_{пв}$).

В зоне количественного регулирования (зона I) наблюдается наибольшее возмущение оптимальных параметров (рис. 3).

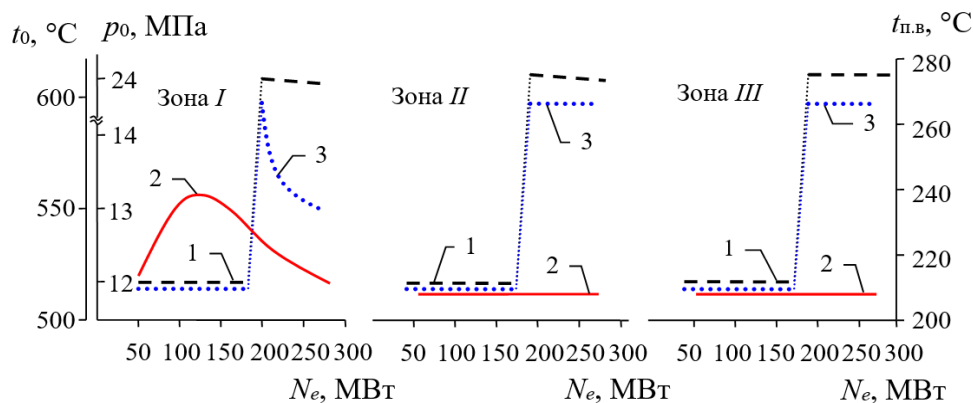


Рис.3. Оптимальные параметры теплофикационных энергоблоков в разных зонах температурного графика: p_0 – давление острого пара (линия 1); t_0 – температура острого пара (линия 2); $t_{п.в.}$ – температура питательной воды (линия 3); I, II, III – зоны количественного, смешанного и качественного регулирования; N_e – единичная электрическая мощность теплофикационных энергоблоков; $t_{пс}$ – температура прямой сетевой воды; $t_{ос}$ – температура обратной сетевой воды; $t_{нв}$ – температура наружного воздуха

Зона I характеризуется нагрузкой горячего водоснабжения, и теплофикационные отборы турбин практически не задействованы. В этом случае оптимальная температура острого пара (t_0) для энергоблоков типа Т с ростом единичной мощности снижается с 555 до 510 °С, что связано с более высокой термодинамической эффективностью мощных теплофикационных энергоблоков даже при работе по «электрическому» графику нагрузки (в конденсационном режиме) (рис. 4). Энергоблоки типа ПТ имеют нагрузку производственного отбора, и ее доля наиболее высока для более мощных турбин (см. табл. 1). Таким образом, чем мощнее турбина типа ПТ, тем больше теряет энергоблок при переходе в зону I температурного графика, тем выше требуется обеспечивать параметры острого пара для него (рис. 4). Очевидно, что в этом случае оптимальный коэффициент теплофикации для блоков типа ПТ существенно выше, чем для блоков типа Т, и стремится к своим максимальным значениям на уровне $\alpha_{ТЭЦ} = 0,7$.

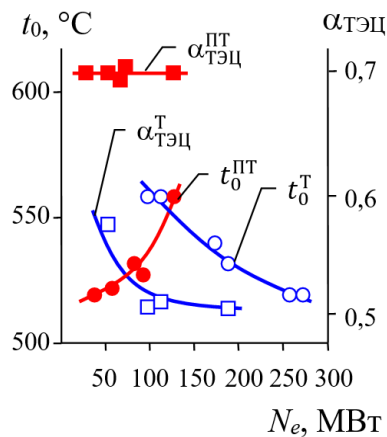


Рис.4. Зависимость оптимальных температуры острого пара (t_0) и коэффициента теплофикации ($\alpha_{ТЭЦ}$) от единичной мощности теплофикационных энергоблоков

Важно отметить, что в каждой зоне температурного графика наблюдается экономия топлива для всех типов энергоблоков при оптимизации их параметров по сравнению с работой традиционного энергоблока в тех же условиях. Экономия может составить от 3 до 30 % в зависимости от типа энергоблока, его мощности и зоны температурного графика. Можно видеть, что в зоне количественного регулирования блоки типа ПТ позволяют экономить больше топлива, чем блоки типа Т; в зоне качественного регулирования, наоборот, блоки Т предпочтительнее, по сравнению с ПТ; а в зоне смешанного регулирования оба типа энергоблоков равноценны (рис. 5).

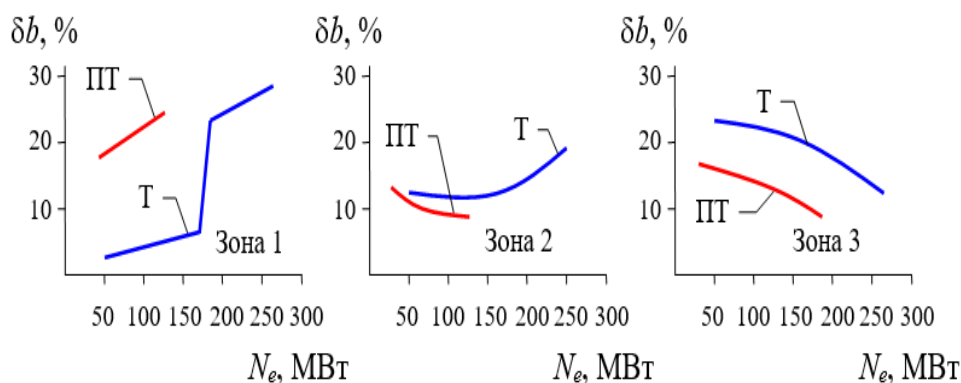


Рис.5. Относительная экономия удельного расхода топлива на отпущенную продукцию при оптимизации параметров теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика

Годовой расход топлива, в соответствии с выражением (2), может быть снижен в условиях зонирования температурного графика приблизительно на 10 % (рис. 6).

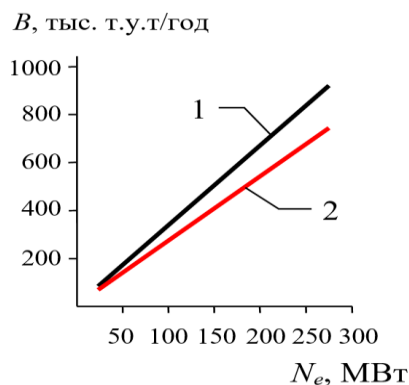


Рис. 6. Расход топлива теплофикационными энергоблоками в условиях расчета по традиционному температурному графику (линия 1) и при его зонировании (линия 2)

Выводы

1. Показано, что при разукрупнении графиков тепловых нагрузок для повышения эффективности работы энергоблоков ТЭЦ может использоваться прием зонирования температурного графика, когда выделяют зоны количественного, смешанного и качественного регулирования отпуска теплоты и критерий минимального расхода топлива.
2. Показано, что оптимальные параметры теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика, в целом, соответствуют стандартным значениям.
3. Показано, что во всех зонах температурного графика можно обеспечить экономию топлива, при этом в зоне количественного регулирования блоки типа ПТ позволяют экономить больше, чем блоки типа Т, в зоне качественного регулирования, наоборот, блоки Т предпочтительнее, по сравнению с ПТ, а в зоне смешанного регулирования оба типа энергоблоков равноценны.
4. Показано, что в условиях зонирования температурного графика годовой расход топлива теплофикационными энергоблоками стандартных типоразмеров может быть снижен приблизительно на 10 %.

Литература

1. Современная электроэнергетика // 29-я международная выставка Электрооборудование. Светотехника. Автоматизация зданий и сооружений. Доступно по: <https://www.elektro-expro.ru/ru/ui/17087/>. Ссылка активна на: 04.08.2018.
2. Андрущенко А.А. Комбинированные системы энергоснабжения // Теплоэнергетика. 1997. №5. С.2–6.
3. Щинников П.А, Ноздренко Г.В, Томилов В.Г. и др. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями: Монография / Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 528 с.
4. Ротов П.В., Орлов М.Е., Шарапов В.И. О температурном графике центрального регулирования систем теплоснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. №5-6. С. 3–12.

5. Шарапов В.И., Ротов П.В. Регулирование нагрузки городских теплофикационных систем. Ульяновск: УлГТУ, 2013. 309 с.
6. Орлов М.Е., Шарапов В.И. Совершенствование структуры и технологий работы городских ТЭЦ и теплофикационных систем. Ульяновск: УлГТУ, 2014. 352с.
7. Ротов, П. В. О зонировании температурного графика центрального регулирования нагрузки теплофикационных систем // Промышленная энергетика. 2013. № 6. С. 21-25.
8. Nakoryakov V.E., Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Grigoryeva O.K. Basic provisions of exergy method and analysis of power plants with state-of-the-art heat pump combined cycle heating systems // Journal of Engineering Thermophysics. 2010. V. 19. N2. pp. 53-61.
9. Пашка Б. Системная эффективность технологии комбинированного теплоснабжения на основе ТЭЦ с внутриквартальными тепловыми насосами // дис. ...к.т.н. Новосибирск, НГТУ, 2011. 22с.
10. Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Serant F.A. and other. Exergic analysis of new boiler technologies within power-generating units of thermal power plant // Thermophysics and Aeromechanics. 2009. N.2. pp. 315-323.
11. А.М. Клер и д.т.н. Э.А.Тюриной Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов / Под ред. д.т.н. : РАН. Новосибирск : Академ. издание «Гео», 2016. 298 с.
12. Elaiw, A. M. Combined Heat and Power Dynamic Economic Dispatch with Emission Limitations Using Hybrid DE-SQP Method // Abstract and Applied Analysis. 2013. pp. 10.
13. Накоряков В.Е., Ноздренко Г.В., Боруш О.В. Комплексные технико-экономические исследования ПГУ с поточными газификаторами // Известия РАН. Энергетика, 2010. №4. С.184–193.
14. Ротов П.В. Совершенствование систем централизованного теплоснабжения, подключенных к ТЭЦ, путем разработки энергоэффективных технологий обеспечения нагрузок отопления и горячего водоснабжения. Дис. ... д.т.н. Иваново: ИГЭУ, 2015. 356 с.
15. Щинников, П.А. Перспективные ТЭС. Особенности и результаты исследования / П. А. Щинников.– Новосибирск: НГТУ, 2007.

Авторы публикации

Синельников Денис Сергеевич – аспирант Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Щинников Павел Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

References

1. Modern power engineering. 29th International Exhibition of Electrical Equipment. Lighting engineering. Automation of buildings and structures. Available at: URL: <https://www.elektro-expo.ru/ru/ui/17087/>. Accessed to: 04.08.2018.
2. Andryushchenko AI. Combined power supply system. *Combined heat and power*. 1997;5:2-7.
3. Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Tomilov V.G. *Comprehensive research of TPPs with new technologies*: Monograph / Novosibirsk: Publishing House of the National Technical University, 2005. 528 p.
4. Rotov P.V., Orlov M.E., Sharapov V.I. The temperature regulation chart central heating systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2014;(5-6):3-12.
5. Sharapov V.I., Rotov P.V. *Load regulation of urban district heating systems*. Ulyanovsk: ULSTU, 2013. P. 309 .
6. Orlov M.E., Sharapov V.I. *Improving the structure and technologies of urban CHP and heating systems*. Ulyanovsk: ULSTU, 2014. P.352.
7. Rotov P.V. About the zoning of the temperature schedule of the central regulation of the heat and power systems load . *Industrial power engineering*. 2013;6:21-25.
8. Nakoryakov V.E., Nozdrenko G.V. Shchinnikov P.A., Grigoryeva O.K. Basic provisions of exergy method and analysis of power plants with state-of-the-art heat pump combined cycle heating systems. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2010;19 (2):53-61.
9. Pashka B. the System efficiency of combined district heating based on CHP with intra-heat pumps. [dissertation]. Novosibirsk, NSTU, 2011.
10. Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Serant F.A. and other. Exergy analysis of new boiler technologies within power-generating units of thermal power plant. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2009;2:315-323.
11. Kler A.M., Turiny E.A. *Optimization studies of power plants and complexes* / RAS, Sib. branch, ISEM. Novosibirsk: Academic Publication "Geo", 2016. P. 298.
12. Elaiw, A.M. Combined Heat and Power Dynamic Economic Dispatch with Emission Limitations Using Hybrid DE-SQP Method / A.M. Elaiw, X.Xia, A.M. Shehata. Abstract and Applied Analysis 2013.

pp.10.

13. Nakoryakov VE., Nozdrenko GV., Borush OV. Integrated technical and economic studies of combined-cycle plants with in-line gasifiers. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2010;4:184-193.

14. Rotov PV. *Improvement of district heating systems connected to the CHP by developing energy-efficient technologies to provide loads of heating and hot water supply*. [dissertation]. Ivanovo: IGEU, 2015.

15. Shchinnikov PA. Promising TPPs. *Features and results of the research*. Novosibirsk.: NGTU, 2007.

Authors of the publication

Denis S. Sinelnikov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Pavel. A. Shchinnikov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Поступила в редакцию

03 декабря 2018 г.

ОБРАТИМЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ФИЛИПСА И КАРНО С РЕАЛЬНЫМ ГАЗОМ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА

В.Г. Киселёв

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2308-1598>, kis_vg@mail.ru

Резюме: Целью данной работы является исследование квазистатических тепловых двигателей Филиппса и Карно, в рамках которого осуществлен сравнительный анализ их работы как для циклов с рабочим телом «идеальный газ», так и для циклов с рабочим телом «реальный газ». В качестве основного метода исследования использован метод термодинамических потенциалов. В результате проведённой работы установлено, что существующая формулировка теоремы Карно справедлива только для рабочего тела «идеальный газ». Таким образом можно сделать вывод о том, что в общем случае теорема Карно может быть сформулирована, например, так: «Коэффициент полезного действия обратимого теплового двигателя максимален, не зависит от свойств теплового двигателя и является функцией температур только горячего и холодного резервуаров:

$$\eta = 1 - f(t_1, t_2),$$

где $f(t_1, t_2)$ – функция только температур t_1 и t_2 горячего и холодного резервуаров. Данная формулировка справедлива только для рабочего тела «идеальный газ». В случае использования в качестве рабочего тела реального газа коэффициент полезного действия теплового двигателя, помимо зависимости от температур горячего и холодного резервуаров, является функцией термодинамических характеристик рабочего тела и типа теплового двигателя, а своего максимального значения для данного вида рабочего тела и типа двигателя он достигает при наличии обратимости рассматриваемой системы».

Ключевые слова: идеальный газ, изотермическое расширение идеального газа, термодинамический потенциал, энергия Гельмгольца, циклические процессы, цикл Филиппса, цикл Карно, адиабатическое расширение идеального газа, химический потенциал.

Для цитирования: Киселёв В.Г. Обратимые тепловые двигатели Филиппса и Карно с реальным газом в качестве рабочего тела // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №4.С.20-32. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-20-32.

REVERSIBLE CARNOT AND PHILIPS HEAT ENGINES WITH A REAL GAS AS A WORKING BODY

VG.Kiselev

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2308-1598>, kis_vg@mail.ru

Abstract: In the article, on the basis of the theory of thermodynamic potentials, a study was made of the quasistatic Phillips and Carnot heat engines in which a comparative analysis was made of their work both for cycles with a working body, an ideal gas, and for cycles with a working body, real gas. On the basis of the conducted research, it was established that the existing formulation of the Carnot theorem is valid only for the working fluid “ideal gas”. In general, based on the above calculations, the Carnot theorem can be formulated, for example, like this: “The efficiency of a reversible heat engine is maximum, does not depend on the properties of the heat engine and is a function of the temperatures of only hot and cold tanks:

$$\eta = 1 - f(t_1, t_2),$$

where $f(t_1, t_2)$ is a function only of the temperatures t_1 and t_2 of the hot and cold tanks. This formulation is valid only for working fluid ideal gas. In the case of using real gas as a working fluid, the efficiency of a heat engine, in addition to dependence on the temperatures of hot and cold tanks, is a function of the thermodynamic characteristics of the working fluid and the type of heat engine, and reaches its maximum value for this type of working fluid and engine type if there is reversibility the system under consideration».

Keywords: ideal gas, isothermal expansion of an ideal gas, thermodynamic potential, Helmholtz's energy, cyclic processes, Carnot cycle, Philips cycle, adiabatic expansion of an ideal gas, chemical potential.

For citation: Kiselev VG. Reversible Carnot and Philips heat engines with a real gas as a working body. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21 (4):20-32. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-20-32.

Введение

В ряде предыдущих публикаций [1–3] автором для анализа простейших термодинамических процессов (изотермическое равновесное и неравновесное расширение идеального газа, смешение идеальных газов и функционирование обратимых тепловых машин Филиппса и Карно с идеальным газом в качестве рабочего тела) был использован метод термодинамических потенциалов. Целью данной работы является проведение сравнительных исследований термодинамических циклов Филиппса и Карно с рабочим телом «реальный газ», базируясь на базовых положениях, положенных в основу более ранних публикаций [1–3], и рассмотрение влияния термодинамических свойств этого газа на коэффициент полезного действия (КПД) данных тепловых двигателей. 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» [1], поэтому второй целью представленной работы автор считает косвенное подтверждение основных принципов, положенных в основу этой более ранней публикации. Для реализации поставленных целей рассмотрим циклические процессы Филиппса и Карно с различными рабочими телами, включающими как реальные, так и идеальные газы.

Достаточно подробный анализ работы цикла Филиппса с рабочим телом «идеальный газ» можно найти, например, в монографии Д. Эверета [4, стр. 259–263], а цикла Карно, соответственно, в монографии И. Пригожина [5, стр. 83–86]. Как в первом, так и во втором случае в соответствии с теоремой Карно КПД этих тепловых двигателей с рабочим телом «идеальный газ» η_i определяется следующим соотношением [5, стр. 87]:

$$\eta_i = 1 + \frac{Q_{CD}}{Q_{AB}} = 1 - \frac{T_B}{T_A}, \quad (1)$$

где T_A – температура верхней, а T_B – соответственно нижней изотермы рассматриваемых циклов; Q_{AB} – количество тепла, поступившего в систему при прохождении ею верхней изотермы; Q_{CD} – количество тепла, отданного системой во время прохождения ею нижней изотермы.

В данной формуле и в дальнейшем, за исключением прямых цитирований, тепло, входящее в систему, будем считать положительным, а выходящее из неё – отрицательным. Аналогично работа, совершённая системой – положительна, а совершённая над системой – отрицательна.

В свою очередь, из монографии И. Пригожина [5, стр. 83] следует, что существующая формулировка теоремы Карно, которая «...сводится к утверждению, что коэффициент полезного действия обратимого теплового двигателя максимален, не зависит от свойств теплового двигателя и является функцией только температур горячего и холодного резервуаров:

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - f(t_1, t_2), \quad (2)$$

где $f(t_1, t_2)$ — функция только температур t_1 и t_2 горячего и холодного резервуаров» справедлива для вполне конкретного понятия КПД, которое задаётся вполне определённым соотношением, а именно:

$$\eta_i = \frac{Q_{AB} + Q_{CD}}{Q_{AB}}. \quad (3)$$

Последнее уравнение можно представить и в следующем виде:

$$\eta_i = \frac{A}{Q_{AB}} \quad (4)$$

где A – общая объёмно-механическая работа, совершаемая в рассматриваемом циклическом обратимом процессе с участием идеального газа в качестве рабочего тела.

Ключевым моментом в определении КПД термодинамической системы, как видно из предыдущего материала и как следует из расчёта коэффициента полезного действия различных термодинамических систем [4,5], является реализация следующего соотношения:

$$A = Q_{AB} + Q_{CD} \quad (5)$$

Иными словами, во всех этих случаях молчаливо предполагается, что объёмно-механическая работа идеальной тепловой машины равна разности количеств теплоты, входящих в систему и выходящих из неё. Реализация последнего уравнения и приводит к соответствующему понятию КПД (формула 4), справедливость которого многократно подтверждена и которое в общем случае имеет место, как мы покажем в дальнейшем, только при использовании в тепловых машинах идеального газа в качестве рабочего тела. Однако есть и другая технически более конкретная формулировка понятия КПД, которую мы находим, например, в политехническом словаре¹ и монографии С. И. Исаева [6] «Коэффициент полезного действия – безразмерная величина η , характеризующая степень совершенства какого-либо технического устройства в отношении осуществления в нём процессов передачи энергии или её преобразования из одной формы в другую. КПД показывает, какая часть (W_P) суммарной подводимой энергии W полезно используется в рассматриваемом устройстве:

$$\eta = \frac{W_P}{W}. \quad (6)$$

Ключевым моментом, отличающим последнюю формулу от аналогичного соотношения, традиционного для термодинамики (3), является использование только полезной работы и суммарной подводимой энергии. В то время как в классической термодинамике принято вместо величины W_P применять величину A , которая определяется формулой (5), т. е. в её формировании участвует и тепло, отводимое из системы. Следует отметить, что в случае использования в качестве рабочего тела в тепловой машине идеального газа W_P полностью соответствует величине $A = Q_{AB} + Q_{CD}$ из формулы (5). Однако при применении газа реального отличие значений этих величин друг от друга может стать весьма существенным и привести к различному толкованию КПД тепловых машин, что мы и покажем в следующих разделах данной работы на примере сравнения циклов Филиппса и Карно, работающих попеременно с реальным и идеальным газом в качестве рабочего тела.

Материалы и методы КПД цикла Филиппса с реальным и идеальным газом в качестве рабочего тела

Как мы уже сказали, достаточно подробный анализ работы цикла Филиппса с рабочим телом «идеальный газ» можно найти, например, в монографии Д. Эверета [4, стр. 259–263]. Там же приведён рисунок, описывающий соответствующий цикл $A-B-C-D$ в координатах давление–объём.

Несколько модернизируем данный график, введя в него диаграмму цикла Филиппса с реальным газом $a-b-c-d$ в качестве рабочего тела, и назовём полученный рис. 1 «Циклы Филиппса и Карно с рабочими телами «реальный» и «идеальный газы» в координатах давление–объём». Примем, без ограничения общности, что в системе находится поочередно по одному молю газа (идеального или реального), что коэффициент летучести реального газа меньше единицы ($\gamma < 1$) и что область изменения параметров давления и объёма рассматриваемых газов соответствует зоне, расположенной ниже верхней точки пересечения изотерм реального и идеального газа на рис. 2, которая носит название «Зависимость давления от объёма для идеального (1) и реального (2) газов».

¹ Политехнический словарь. Москва: Издательство «Советская энциклопедия». 1977, с. 237.

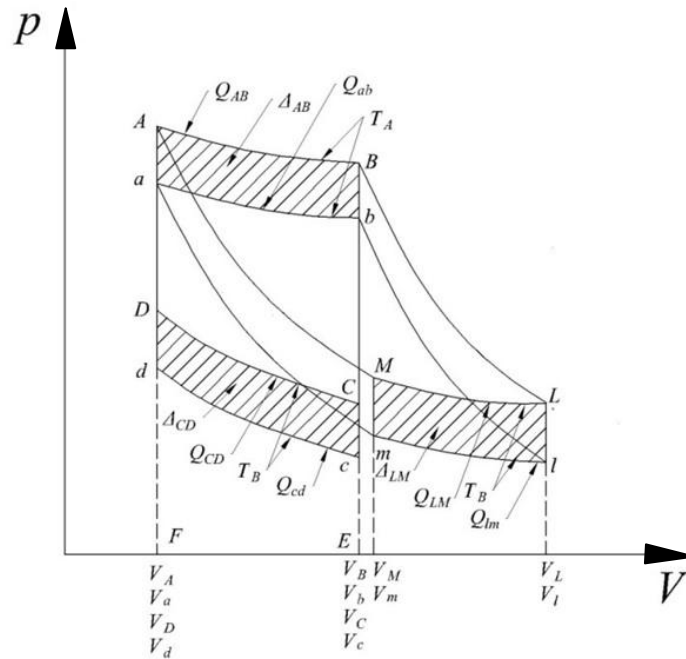


Рис. 1. Циклы Филиппа и Карно с рабочими телами «реальный» и «идеальный» газы в координатах давление–объём

Данный график приведён, в частности, в монографии Н. Измайлова [7, стр. 22]. Обозначим объёмы, соответствующие началу и концу верхних и нижних изотерм цикла Филиппа для идеального газа V_A , V_B , V_C , V_D , а для газа реального V_a , V_b , V_c , V_d . При этом очевидно, исходя из понятия цикл Филиппа и геометрии рис. 1, что $V_A = V_D = V_a = V_d$ и $V_B = V_C = V_b = V_c$. Кроме того, обозначим площади фигур $A-B-b-a$ и $D-C-c-d$, соответственно, S_{ABba} и S_{DCcd} , тогда на основании монографии Н. Измайлова [7, стр. 22] с учётом знака они равны избыточной работе расширения (сжатия) для верхней S_{ABba} и нижней изотерм S_{DCcd} рассматриваемого цикла, т.е. величинам Δ_{AB} и Δ_{CD} . После сделанных вводных замечаний перейдём к непосредственному анализу КПД тепловой машины Филиппа с реальным и идеальным газом в качестве рабочего тела.

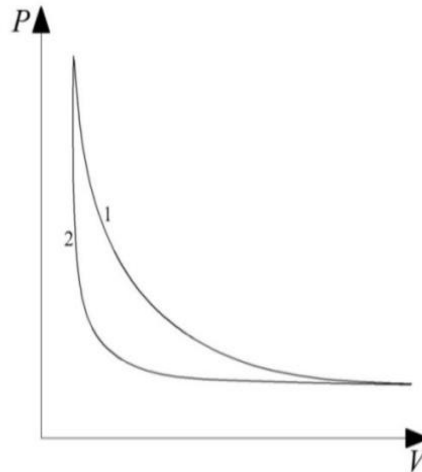


Рис. 2. Зависимость давления от объёма для идеального (1) и реального (2) газов

Такт 1. Изотермические переходы при температуре T_A . Идеальный газ. Переход A–B.

В этом случае, в соответствии с Д. Эверетом [4, стр. 260–261] и Н. Измайловым [7, стр. 21–22], сторонняя работа, совершаемая одним молем идеального газа A_{AB} , определяется выражением

$$A_{AB} = \int_A^B p dV = RT_A \ln \frac{V_B}{V_A} = S_{ABEF}, \quad (7)$$

где P – давление газа (идеального или реального); V – текущий объём газа (идеального или реального); V_A и V_B соответственно молярный объём идеального газа в начале и конце верхней изотермы цикла Филиппа или Карно; T_A – температура газа в верхней изотерме цикла Филиппа или Карно, а R – универсальная газовая постоянная; S_{ABEF} – площадь фигуры $A-B-E-F$.

В таком изотермическом процессе с участием идеального газа теплота Q_{AB} поглощается из резервуара, и при этом выполняется следующее соотношение:

$$A_{AB} = Q_{AB} . \quad (8)$$

Следует особо отметить, что величине A_{AB} и её энергетическому эквиваленту Q_{AB} соответствует площадь фигуры $A-B-E-F$ (рис. 1).

Реальный газ, коэффициент летучести меньше единицы. Переход $a-b$.

В этом случае сторонняя работа, совершаемая реальным газом A_{ab} , определяется следующим соотношением [7, стр. 22]:

$$A_{ab} = \int_a^b P dV = S_{abEF} , \quad (9)$$

где S_{abEF} – площадь фигуры $a-b-E-F$, соответствующая величине сторонней работы A_{ab} машины Филиппа или Карно с реальным газом в качестве рабочего тела на верхней изотерме $a-b$ при его изотермическом расширении.

Следует отметить, что при принятых нами условиях давление реального газа в выбранном нами интервале объёмов всегда меньше давления газа идеального. В свою очередь, разница между объёмно-механической работой идеального газа A_{AB} и объёмно-механической работой реального газа A_{ab} будет составлять некоторую величину Δ_{AB} , которая называется Н. Измайловым избыточной работой расширения и определяется [7, стр. 22] площадью фигуры $A-B-b-a$, то есть иначе можно записать:

$$\Delta_{AB} = S_{ABba} \quad (10)$$

В таком случае следует констатировать (рис. 1), что тепло, получаемое системой с реальным газом (с коэффициентом летучести меньше единицы), расходуется как собственно на совершение сторонней работы A_{ab} , так и на работу против сил внутреннего давления Δ_{AB} , т.е. взаимного притяжения частиц газа. При этом необходимо отметить, что на изотерме $a-b$ само количество тепла, поглощённого реальным газом Q_{ab} остаётся неизменным, то есть равным теплу Q_{AB} , поглощаемому идеальным газом на изотерме $A-B$. Таким образом, для верхней изотермы цикла Карно с попеременным участием реального газа с коэффициентом летучести меньше единицы и идеального газа можно записать следующие соотношения

$$Q_{AB} = Q_{ab} , \quad (11)$$

$$A_{AB} = A_{ab} + \Delta_{AB} > 0 , \quad (12)$$

$$\Delta_{AB} > 0 . \quad (13)$$

*Такт 2. Изохорное охлаждение идеального и реального газа
Идеальный газ. Переход $B-C$.*

В этом случае, в соответствии с Д. Эверетом [4, стр. 261–262], сторонняя работа отсутствует, т.е. $A_{BC} = 0$. Теплообменник, находящийся внутри машины Филиппа запасает тепло в количестве $C_v(T_A - T_B)$, где C_v – теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме, что фактически означает потерю тепла идеальным газом в количестве Q_{BC} , равную

$$Q_{BC} = -C_v(T_A - T_B) \quad (14)$$

В тоже время следует отметить, что теплообмен машины Филиппа с внешней средой отсутствует.

Реальный газ.

Переход $b-c$. Коэффициент летучести реального газа меньше единицы

Примем, без ограничения общности и с целью упрощения последующих расчётов, что удельная теплоёмкость реального газа при постоянном объёме $V_b = V_c$ равна C_{bc} и не зависит ни от объёма, ни от температуры в рассматриваемом интервале изменений

соответствующих параметров цикла Филиппса. Очевидно, что в этом случае, по аналогии с предыдущим подпунктом, можно записать, что сторонняя работа $A_{bc} = 0$. Теплообменник, находящийся внутри машины Филиппса, запасает тепло в количестве $C_{bc}(T_A - T_B)$, что фактически означает потерю тепла реальным газом в количестве Q_{bc} . Данное обстоятельство позволяет записать следующее соотношение:

$$Q_{bc} = -C_{bc}(T_A - T_B). \quad (15)$$

В тоже время следует отметить, что и в этом случае теплообмен машины Филиппса с внешней средой отсутствует.

Такт 3. Изотермические переходы при температуре T_B

Идеальный газ. Переход C–D

Рассмотрение этого процесса проведём по аналогии с тактом 1. В этом случае, в соответствии с Д. Эверетом [4, стр. 262], сторонняя работа (отрицательная), совершаемая над идеальным газом, определяется следующим выражением:

$$A_{CD} = \int_C^D PdV = RT_B \ln \frac{V_D}{V_C} = -S_{DCEF}, \quad (16)$$

где S_{DCEF} – площадь фигуры $D-C-E-F$.

Величина сторонней работы A_{CD} , совершаемой над системой, определяется площадью фигуры $D-C-E-F$, изображённой на рис. 1 и взятой с обратным знаком. В таком изотермическом процессе с участием идеального газа теплота Q_{CD} отдаётся в холодильник и при этом выполняется следующее соотношение:

$$A_{CD} = Q_{CD}. \quad (17)$$

Реальный газ с коэффициентом летучести меньше единицы

Переход c–d.

В этом случае сторонняя работа (отрицательная), совершаемая реальным газом A_{cd} , определяется, по аналогии с предыдущим выражением, соотношением

$$A_{cd} = \int_c^d PdV = -S_{dcEF}, \quad (18)$$

где S_{dcEF} – площадь фигуры $d-c-E-F$.

Величина сторонней работы A_{cd} , совершаемой над системой, определяется площадью фигуры $d-c-E-F$, изображённой на рис. 1 и взятой с обратным знаком.

В свою очередь, разница между объёмно-механической работой реального газа A_{cd} и объёмно-механической работой идеального газа A_{CD} будет составлять некоторую величину Δ_{CD} (отрицательную), которая называется Н. Измайловым избыточной работой расширения и определяется [5, стр. 22], при принятой нами системе знаков, разностью площадей фигур $D-C-F-E$ и $d-c-F-E$, взятой с обратным знаком (рис. 1). Иными словами, можно записать

$$\Delta_{CD} = -S_{DCcd}, \quad (19)$$

где S_{DCcd} – площадь фигуры $D-C-c-d$.

В таком случае можно констатировать (рис. 1), что работа, получаемая системой с реальным газом (с коэффициентом летучести меньше единицы), трансформируется в тепло, отдаваемое в холодильник. Кроме того, в холодильник переходит и тепло, генерируемое реальным газом в результате формирования более прочных, чем в начале рассматриваемой изотермы, молекулярных связей и эквивалентное величине работы Δ_{CD} , определяемой площадью S_{DCcd} , взятой с обратным знаком. Таким образом, для нижней изотермы цикла Филиппса с попеременным участием реального газа с коэффициентом летучести меньше единицы и идеального газа можно записать следующие соотношения:

$$Q_{CD} = Q_{cd}, \quad (20)$$

$$A_{DA} = 0, \quad (21)$$

$$\Delta_{CD} < 0. \quad (22)$$

Такт 4. Изохорное нагревание идеального и реального газа**Идеальный газ. Переход D–A.**

В этом случае, в соответствии с Д. Эверетом [4, стр. 262], сторонняя работа отсутствует, т.е. $A_{DA} = 0$. Теплообменник, находящийся внутри машины Филиппа, теряет тепло в количестве $C_v(T_A - T_B)$, где C_v – теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме, что фактически означает получение тепла идеальным газом в количестве Q_{BC} , равном величине

$$Q_{DA} = C_v(T_A - T_B) \quad (23)$$

В тоже время, следует отметить, что теплообмен машины Филиппа с внешней средой отсутствует. Сравнение величины Q_{DA} из предыдущей формулы и величины Q_{BC} из раздела «Такт 2», позволяет записать следующее соотношение:

$$Q_{DA} = -Q_{BC} \quad (24)$$

Реальный газ с коэффициентом летучести меньше единицы. Переход d–a

Примем, без ограничения общности, с целью упрощения последующих расчётов, что удельная теплоёмкость реального газа при постоянном объёме $V_d = V_a$ равна $C_{da} = C_{bc}$. Кроме того, она не зависит ни от объёма, ни от температуры в рассматриваемом интервале. изменений соответствующих параметров цикла Филиппа. Очевидно, что в этом случае, по аналогии с предыдущим пунктом, можно записать, что сторонняя работа $A_{da} = 0$. Теплообменник, находящийся внутри машины Филиппа, теряет тепло в количестве $C_{da}(T_A - T_B)$, что фактически означает приобретение тепла реальным газом в количестве Q_{dc} . Данное обстоятельство позволяет записать:

$$Q_{da} = C_{da}(T_A - T_B) \quad (25)$$

Сравнение величины Q_{da} из предыдущей формулы и величины Q_{dc} из раздела «Такт 2» делает актуальным равенство

$$Q_{da} = -Q_{bc} \quad (26)$$

В тоже время следует отметить, что теплообмен машины Филиппа с внешней средой отсутствует.

КПД цикла Филиппа с реальным и идеальным газом в качестве рабочего тела

В случае цикла Филиппа с рабочим телом «реальный газ», его КПД η_r можно рассчитать также с использованием формулы, схожей с соответствующей формулой для идеального газа:

$$\eta_r = \frac{A_r}{Q_{ab}} \quad (27)$$

Однако выражение для работы (обозначим её для рассматриваемого случая A_r) будет выглядеть несколько иначе, так как вместо давления идеального газа при её вычислении придётся использовать давление реального газа, а вместо объёма идеального газа – объём реального газа, которые, естественно, не подчиняются уравнению состояния газа идеального, а при наложенных нами условиях (коэффициент летучести меньше единицы) работа будет меньше, чем соответствующая работа, производимая газом идеальным (при $\gamma > 1$ следует ожидать обратного результата). В таком случае (рис. 1) определение КПД цикла можно проводить с использованием, в частности, результатов, полученных нами в предыдущем разделе данной работы, среди которых следует выделить, прежде всего, следующие утверждения, имеющиеся у нас в отношении идеального газа:

Суммарная работа или тепловыделение (теплопоглощение) на изохорах равно нулю при принятых нами ранее условиях, при использовании идеального газа в качестве рабочего тела в рассматриваемой тепловой машине Филиппа.

Положительная объёмно-механическая работа тепловой машины Филиппа с рабочим телом «идеальный газ» на верхней изотерме (рис. 1) равняется A_{AB} , которая определяется площадью фигуры $A-B-E-F$, то есть величиной S_{ABEF} .

Отрицательная объёмно-механическая работа тепловой машины Филиппа с рабочим телом «идеальный газ» на нижней изотерме (рис. 1) равняется величине A_{CD} , которая определяется площадью фигуры $D-C-E-F$, взятой с обратным знаком, то есть величиной $-S_{DCEF}$.

Общая положительная работа при прохождении одного цикла тепловой машины Филиппа с рабочим телом «идеальный газ» (рис. 1) равняется сумме величин A_{AB} и A_{CD} , которая определяется разностью площадей фигуры $A-B-E-F$ и $D-C-E-F$, т.е. площадью фигуры $A-B-C-D$. Иными словами, справедливо следующее соотношение:

$$A_{ABCD} = S_{ABEF} - S_{DCEF}. \quad (28)$$

В свою очередь, в отношении газа реального можно высказать следующие утверждения:

При принятых нами ранее условиях в рассматриваемой тепловой машине Филиппа при использовании реального газа в качестве рабочего тела суммарная работа и тепловыделение (телопоглощение) на изохорах равно нулю.

Положительная объёмно-механическая работа тепловой машины Филиппа с рабочим телом «реальный газ» на верхней изотерме (рис. 1) равняется A_{ab} и определяется площадью фигуры $a-b-E-F$, то есть величиной S_{abEF} .

Положительная химическая работа (работа по преодолению сил Ван-дер-Ваальса) тепловой машины Филиппа с рабочим телом «реальный газ» на верхней изотерме (рис. 1) равняется Δ_{AB} и определяется площадью фигуры $A-B-b-a$, то есть величиной S_{ABba} .

Общая положительная работа (объёмно-механическая и химическая) тепловой машины Филиппа с рабочим телом «реальный газ» на верхней изотерме (рис. 1) равняется сумме A_{ab} и Δ_{AB} и определяется площадью фигуры $A-B-E-F$, то есть величиной S_{ABEF} .

Отрицательная объёмно-механическая работа тепловой машины Филиппа с рабочим телом «реальный газ», осуществляемая на нижней изотерме (рис. 1), равняется величине A_{cd} и определяется площадью фигуры $d-c-E-F$, взятой с обратным знаком, то есть величиной $-S_{cdEF}$.

Отрицательная химическая работа (работа совершаемая силами Ван-дер-Ваальса в процессе укрепления молекулярных связей) тепловой машины Филиппа с рабочим телом «реальный газ», осуществляемая на нижней изотерме (рис. 1), равняется величине Δ_{CD} и определяется площадью фигуры $D-C-c-d$, взятой с обратным знаком, то есть величиной $-S_{DCcd}$.

Общая отрицательная работа (объёмно-механическая и химическая) тепловой машины Филиппа с рабочим телом «реальный газ» на нижней изотерме (рис. 1) равняется сумме работ A_{cd} и Δ_{CD} и определяется площадью фигуры $D-C-E-F$, то есть величиной $-S_{DCEF}$.

Резюмируя сделанные выводы, можно утверждать, что, с одной стороны, существует формула, определяющая традиционное для термодинамики понятие КПД для тепловых двигателей с рабочим телом «идеальный газ» через объёмно-механическую работу и подводимое тепло:

$$\eta_{iA} = \frac{A_{AB} + A_{CD}}{Q_{AB}}. \quad (29)$$

С другой стороны, существует и эквивалентное ей выражение, определяющее КПД тепловых машин, использующих идеальный газ в качестве рабочего тела, через тепло, подводимое и отводимое от системы:

$$\eta_{iQ} = \frac{Q_{AB} + Q_{CD}}{Q_{AB}}. \quad (30)$$

В случае газа реального, в силу наличия химической работы, ситуация несколько осложняется. Действительно, «тепловой» КПД для реального газа η_{rQ} в этом случае останется в неизменном виде:

$$\eta_{rQ} = \frac{Q_{AB} + Q_{CD}}{Q_{AB}} = \frac{Q_{ab} + Q_{cd}}{Q_{ab}}. \quad (31)$$

Однако КПД, связанный со сторонней объёмно-механической работой (назовём его условно «рабочим» КПД), претерпит существенные изменения и будет определяться следующим соотношением:

$$\eta_{rA} = \frac{(A_{AB} - \Delta_{AB}) + (A_{CD} - \Delta_{CD})}{Q_{AB}} = \frac{A_{ab} + A_{cd}}{Q_{ab}} = \frac{A_{ab} + A_{cd}}{Q_{AB}}. \quad (32)$$

Более того, в этом случае можно для описания процесса изменения химической энергии в системе, который в чем-то схож с явлением потери электрической энергии в цепях с переменным током при несогласованной реактивной нагрузке, ввести соответствующую характеристику. Последнюю, по аналогии с предыдущим материалом, мы назовём «химическим» КПД η_{rX} . Однако следует иметь в виду, что фактически η_{rX} характеризует количество тепловой энергии, переносимой в тепловой машине за счет химических процессов при совершении ею одного полного цикла, делённое на количество тепла, поступившего в систему. Таким образом, для этого случая мы можем записать уравнение

$$\eta_{rX} = \frac{(\Delta_{AB}) + (\Delta_{CD})}{Q_{AB}} = \frac{(\Delta_{AB}) + (\Delta_{CD})}{Q_{ab}}. \quad (33)$$

Заканчивая на этом рассмотрение цикла Филипса, отметим, что для реализации и цели, поставленной нами во введении к данной статье, необходимо провести аналогичный анализ цикла Карно, работающего с реальным и идеальным газом в качестве рабочего тела, что мы и сделаем в следующем разделе предлагаемой работы.

Результаты и их обсуждение

КПД цикла Карно с реальным и идеальным газом в качестве рабочего тела

Для решения задачи по сравнительному исследованию циклов Филипса и Карно с рабочим телом «реальный газ» воспользуемся рис. 1 под названием «Циклы Филипса и Карно с рабочими телами «реальный» и «идеальный газы» в координатах давление–объём». Примем, что температуры изотерм цикла Карно равны соответствующим температурам цикла Филипса (рис. 1), а верхняя изотерма цикла Филипса полностью совпадает с верхней изотермой цикла Карно. Кроме того, также как и ранее будем считать, что теплоёмкости как реального, так и идеального газа не зависят ни от температуры, ни от объёма в рассматриваемых пределах изменения параметров цикла Карно, что приводит к «сокращению» адиабат и позволяет нам избежать необходимости их учёта при рассмотрении КПД процесса. И наконец, совпадение верхних изотерм цикла Филипса и цикла Карно делает возможным утверждение о различии этих циклов в отношении КПД, только если будет доказано, что объёмно-механические работы на их нижних изотермах отличаются друг от друга. Как мы установили ранее, для цикла Филипса с попеременным участием идеального и реального газа в качестве рабочего тела рассматриваемая работа на нижней изотерме определяется формулой

$$A_{CD} = A_{cd} + \Delta_{CD}. \quad (21^*)$$

Соответственно «рабочий» КПД с реальным газом в этом случае представлен соотношением

$$\eta_{rAF} = \frac{(A_{AB} - \Delta_{AB}) + (A_{CD} - \Delta_{CD})}{Q_{AB}} = \frac{A_{ab} + A_{cd}}{Q_{ab}} = \frac{A_{ab} + A_{cd}}{Q_{AB}}. \quad (32^*)$$

Аналогичные формулы для цикла Карно будут выглядеть следующим образом:

$$A_{LM} = A_{lm} + \Delta_{LM}, \quad (34)$$

$$\eta_{rAK} = \frac{(A_{AB} - \Delta_{AB}) + (A_{LM} - \Delta_{LM})}{Q_{AB}} = \frac{A_{ab} + A_{lm}}{Q_{ab}} = \frac{A_{ab} + A_{lm}}{Q_{AB}}. \quad (35)$$

В случае использования идеального газа в качестве рабочего тела между объёмно-механической работой, производимой на верхних и нижних изотермах термодинамического цикла, существует вполне однозначное соответствие, определяемое только отношением абсолютных температур. Данное обстоятельство приводит к равенству логарифмов отношений соответствующих объёмов идеального газа и, следовательно, равенству отношений самих объёмов идеального газа [5, стр. 83–86]. В тоже время и работы A_{CD} и A_{LM} при этих обстоятельствах равны друг другу. Однако в силу того, что в общем случае невозможно вывести сколько-нибудь точную функциональную зависимость изменения давления газа реального при изменении давления газа идеального (это подтверждается, в частности, самим введением понятия «летучесть» и наличием множества уравнений для описания состояния реального газа [8, стр. 140–142, 132–136]), то можно утверждать, что

величины A_{cd} и A_{lm} не равны друг другу. Это обстоятельство позволяет записать следующее соотношение:

$$A_{cd} \neq A_{lm}. \quad (36)$$

Аналогичная ситуация наблюдается и с величинами Δ_{CD} и Δ_{LM} :

$$\Delta_{CD} \neq \Delta_{LM}. \quad (37)$$

Таким образом, можно констатировать, что при использовании одного и того же реального газа в качестве рабочего тела «рабочий» КПД цикла Филиппа и «рабочий» КПД цикла Карно не равны друг другу, и это отличие $\Delta\eta_{rA}$, на основании формул (32*) и (35), можно определить с использованием следующего соотношения:

$$\Delta\eta_{rA} = \frac{|\Delta_{CD} - \Delta_{LM}|}{Q_{AB}} = \frac{|\Delta_{CD} - \Delta_{LM}|}{Q_{ab}}. \quad (38)$$

В отношении «теплого» КПД $\Delta\eta_{rQ}$ можно утверждать, что никаких изменений не наблюдается, т.е. что в этом случае справедливо равенство

$$\Delta\eta_{rQ} = 0. \quad (39)$$

Перед заключительным обсуждением полученных соотношений необходимо отметить, что многие рассуждения, приведённые в литературе в отношении химической энергии идеального газа, содержат в себе внутреннее противоречие. Действительно, в монографии Д. Эверта [4, стр. 70–71] напрямую говорится, что химический потенциал идеального газа μ , который равен его молярной свободной энергии Гиббса, определяется равенством

$$\mu = \mu^0(T) + RT \ln P, \quad (40)$$

где $\mu^0(T)$ – стандартное значение химического потенциала идеального газа.

Иными словами, химический потенциал идеального газа является функцией его давления или объёма при фиксированной температуре. С другой стороны, в монографии И. Пригожина [5, стр. 157–158] читаем: «Из уравнения состояния идеального газа следует, что полная внутренняя энергия при фиксированной температуре не зависит от объёма, т.е. энергия идеального газа зависит только от температуры». В рассматриваемых нами изотермах, с одной стороны, происходит изменение химической энергии, которую принято, как правило, считать частью внутренней энергии, с другой – эти изменения отсутствуют. Для преодоления этого противоречия рассмотрим взаимосвязь между объединённым уравнением термодинамики и химической энергией (в нашем случае для одного моля) идеального газа.

Объединённое уравнение термодинамики и химическая энергия идеального газа

В соответствии с Л. Антроповым [9, стр. 11]: «Для обратимых систем первое и второе начала (законы) термодинамики можно представить в виде четырёх не сводимых друг другу характеристических термодинамических функций:

$$U = TS - PV \quad (41)$$

Для нашего рассмотрения достаточно одной из них, а именно – внутренней энергии. В случае системы с химическими превращениями [9, стр. 14] последнее уравнение следует расширить, включив в него слагаемое, отвечающее химической энергии:

$$U = TS - PV + \sum \mu_i n_i \quad (42)$$

Полный дифференциал этой функции равен [9, стр. 15]

$$dU = TdS + SdT - PdV - VdP + \sum \mu_i dn_i + \sum n_i d\mu_i \quad (43)$$

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

$$dU = TdS - PdV - VdP + d\mu \quad (44)$$

Известно, что химический потенциал одного моля идеального газа определяется формулой (40). Тогда его дифференциал при постоянной температуре будет выглядеть следующим образом:

$$d\mu = \frac{RT}{P} dP. \quad (45)$$

Подстановка последнего соотношения в уравнение, стоящее перед ним, и преобразование его с учётом термического уравнения состояния, записанного для одного моля идеального газа, а также сокращение подобных членов позволяют получить уже известную нам характеристическую функцию для внутренней энергии:

$$dU = TdS - PdV. \quad (46)$$

Следовательно, можно утверждать, что введение химической энергии в объединённое уравнение термодинамики, описывающее состояние одного моля идеального газа, математически никоим образом не влияет на вид этого уравнения, а значит и других термодинамических функций, получаемых на его основе. С другой стороны, опираясь на основные положения физической химии [2], в этом случае можно говорить о протекании эндотермической химической реакции в квазистатических условиях, в рамках которой происходит изменение энергии Гиббса рассматриваемой системы в точности равно объёмно-механической работе, совершаемой ею, а также количеству тепла, поглощаемому системой в результате протекания данного процесса.

Выводы

В рамках данной работы установлено, что КПД квазистатических циклов Филиппа и Карно определяется, в том числе, и свойствами реального газа. С точки зрения термодинамики [9, стр. 16–19; 10; 11; 12, 13, 14, 15, 16] этот результат вполне ожидаем, так как известно, что при равновесном протекании электрохимических реакций сторонняя работа, осуществляемая за счёт химической энергии, может происходить как с поглощением, так и с выделением тепла. С другой стороны, разные термодинамические циклы, даже при полном совпадении, например, верхних изотерм и «взаимоуничтожении» у каждого из этих циклов адиабат, имеют существенно различающиеся параметры по давлению и(или) объёму на нижних изотермах. Данное обстоятельство приводит, например, для циклов Филиппа и Карно, в случае использования в них в качестве рабочего тела идеального газа, к производству на этом этапе одного и того же количества работы. В случае же использования в данных циклах газа реального, в силу зависимости его параметров, в частности, давления от объёма, по законам отличным от уравнения состояния идеального газа и как правило с относительным снижением давления при росте их объёма, объёмно-механические работы на этом этапе, а значит и в рассматриваемых циклах в общем случае будут различными. Иными словами, количество объёмно-механической работы, произведённое квазистатической системой, является функцией не только количества тепла, поглощённого ею, но и величины изменения химической энергии, происшедшего в ней в результате рассматриваемого процесса. Очевидно, что аналогичная ситуация, с точностью до знака, будет наблюдаться и при совершении работы над системой. Кроме того, следует отметить, что при функционировании двигателей в зоне давлений выше точки пересечения изотерм реального и идеального газа следует ожидать эффект, противоположный рассмотренному, т.е. не понижение, а повышение «рабочего» КПД тепловых машин Филиппа и Карно.

Резюмируя сказанное, на основании проведённой работы можно сделать следующие выводы:

1. Существующая формулировка теоремы Карно, которая, например, в монографии И. Пригожина [5, стр. 83] представлена в следующем виде: «... коэффициент полезного действия обратимого теплового двигателя максимален, не зависит от свойств теплового двигателя и является функцией температур только горячего и холодного резервуаров:

$$\eta = 1 - \frac{Q_B}{Q_A} = 1 - f(t_1, t_2) \quad (47)$$

где $f(t_1, t_2)$ – функция только температур t_1 и t_2 горячего и холодного резервуаров» справедлива только для рабочего тела «идеальный газ».

2. В общем случае, на основании приведенных вычислений, теорема Карно может быть сформулирована, например, так: «Коэффициент полезного действия обратимого теплового двигателя максимален, не зависит от свойств теплового двигателя и является функцией температур только горячего и холодного резервуаров:

$$\eta = 1 - f(t_1, t_2) \quad (48)$$

где $f(t_1, t_2)$ – функция только температур t_1 и t_2 горячего и холодного резервуаров. Данная формулировка справедлива только для рабочего тела «идеальный газ». В случае использования в качестве рабочего тела «реальный газ» коэффициент полезного действия теплового двигателя, помимо зависимости от температур горячего и холодного резервуаров,

является функцией термодинамических характеристик рабочего тела и типа теплового двигателя, а своего максимального значения для данного вида рабочего тела и типа двигателя он достигает при наличии обратимости рассматриваемой системы».

Литература

1. Киселёв В.Г. Парадокс Гиббса и его решение // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 11-12. С. 129–137.
2. Киселёв В.Г. Изотермическое расширение идеального газа и химическое сродство // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 11-12. С. 142–151.
3. Киселёв В.Г. Тепловые машины Филиппа и Карно с точки зрения теории термодинамических потенциалов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 154–165.
4. Эверетт Д. Введение в химическую термодинамику: монография. М.: «Издательство иностранной литературы», 1963. 279 с.
5. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: монография // М: Мир, 2002. 461 с.
6. Исаев С. И. Курс химической термодинамики. М.: «Машиностроение» 1975. 255 с.
7. Измайлов Н.А. Электрохимия растворов: монография. М.: «Химия», 1976. 488 с.
8. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика: монография. М.–Л.: «Государственное научно-техническое издательство химической литературы», 1953. 611 с.
9. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия: монография. М.: «Высшая школа», 1975. 568 с.
10. Gibbs J. Willard. The Collected Works. N.Y. London–Toronto: Longmans, Green and Co. 1928. Т. 1. XXVIII. pp.434.
11. Thomson W., Mathematical and Physical Papers. 1882. Article «On the dynamical theory of heat» 1851. V1. pp. 174–232.
12. Ihnatovych V. Study of the possibility of eliminating the Gibbs paradox within the framework of classical thermodynamics. Preprint at <http://arxiv.org/pdf/1306.5737>. 2014.
13. Ihnatovych V. The logical foundations of Gibbs' paradox in classical thermodynamics. Preprint at <http://arxiv.org/pdf/1305.0742>. 2014.
14. 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.
15. Ihnatovych V. Explanation of the Gibbs paradox. URL: <https://zenodo.org/record/2908285>.
16. Ihnatovych Volodymyr. Explanation of the Gibbs paradox. Zenodo. 2019, May 18. <http://doi.org/10.5281/zenodo.2908285>.

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. Kiselyov VG. Paradoxs Gibbsa i ego reshenie. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;11-12:129–137.
2. Kiselyov VG. Izotermicheskoe rasshirenie ideal'nogo gaza I himicheskoe srodstvo. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(11-12): 142–151.
3. Kiselyov VG. Teplovye mashiny Filipisa I Karno s tochki zreniya teorii termodinamicheskikh potencialov *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018; 20(9-10):154–165.
4. Everet D. *Vvedenie v himicheskuyu termodinamiku*: monografiya. Everet. M.: «Izdatel'stvo inostrannoj literatury», 1963.
5. Prigozhin I., Kondepudi D. *Sovremennay termodinamika. Ot teplovyh dvigatelej do dissipativnyh struktur*: M: Mir, 2002.
6. Isaev SI. *Kurs himicheskoy termodinamiki*. M: «Mashinostroenie» 1975.
7. Izmajlov NA. *Elektrohimiya rastvorov*: monografiya. M: «Himiya», 1976.
8. Karapet'yanc MH. *Himicheskaya termodinamika*. monografiya. M.–L.: «Gosudarstvenno-nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo himicheskoy literatury», 1953.
9. Antropov LI. *Teoreticheskaya elektrohimiya*: monografiya. M: «Vysshaya shkola», 1975.
10. Gibbs J. Willard. *The Collected Works*. N. Y. London - Toronto: Longmans, Green and Co., 1928. Т. 1. XXVIII. pp. 434.

11. Thomson W. Mathematical and Physical Papers. 1882. *Article «On the dynamical theory of heat»* 1851. pp. 174-232.

12. Ihnatovych V. Study of the possibility of eliminating the Gibbs paradox within the framework of classical thermodynamics. Preprint at <http://arxiv.org/pdf/1306.5737>. 2014.

13. Ihnatovych V. *The logical foundations of Gibbs' paradox in classical thermodynamics*. Preprint at <http://arxiv.org/pdf/1305.0742>. 2014.

14. 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.

15. Ihnatovych V. Explanation of the Gibbs paradox. Available at :URL: <https://zenodo.org/record/2908285>.

16. Ihnatovych Volodymyr. *Explanation of the Gibbs paradox*. Zenodo. 2019, May 18. Available at: doi.org/10.5281/zenodo.2908285.

Authors of the publication

Vladimir G. Kiselev – Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.

Поступила в редакцию

28 марта 2019 г.



ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Л.Р.Мухаметова¹, И.Г.Ахметова¹, В.Стриелковски²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

liliyamyhametova@mail.ru

²Пражский институт повышения квалификации, г. Прага, Чехия

strielkowski@gmail.com

Резюме: Инновационные технологии находят применение в самых разных областях человеческой жизни. Энергетическая сфера не является исключением, особенно в части вопросов эффективного хранения и использования энергии.

Научных разработок в этих областях существует достаточно много. Одни из них находятся на стадии теоретической разработки, а другие уже существуют в области работающих прототипов. Технологии накопления энергии сохраняют энергию, когда потребление ниже, чем ее производство, и снабжают энергией, когда потребление выше, чем ее производство. Это обеспечивает энергетическую безопасность и готовность к чрезвычайным ситуациям, например в случае аварии на электростанции; дает возможность балансировать нагрузки сети, где электричество генерируется с помощью возобновляемой энергии. Системы хранения энергии полезны и для потребителей – благодаря им возможно поддерживать стабильные цены на электроэнергию в масштабе общей сети или обеспечить индивидуальную гибкость и независимость потребления при локальном хранении в домах.

Развитие систем накопления и хранения энергии становится потенциальным методом решения проблем глобальной энергетической системы. Однако существуют технические и нетехнические барьеры, препятствующие широкому распространению устройств накопления энергии. В связи с этим необходимо выявить инновационные процессы, механизмы и системы, которые позволяют разработкам в области накопления энергии содействовать решению проблем энергетической системы, а также обеспечить промышленный рост за счет компаний, занимающихся разработкой технологий. В данной статье рассматриваются актуальные достижения и тенденции в области инноваций в сфере накопления энергии. Научная новизна статьи заключается во всестороннем обзоре современного положения дел в данной области и определении основных направлений развития.

Ключевые слова: хранение энергии; устройство накопления энергии; аккумуляторы; энергетическая политика.

Для цитирования: Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Стриелковски В. Инновации в области хранения энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №4. С. 33-40. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40.

INNOVATIONS IN ENERGY STORAGE

L.R. Mukhametova¹, I.G. Akhmetova¹, W. Strielkowski²

¹Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

liliyamyhametova@mail.ru

²Prague Institute for Qualification Enhancement, Prague Czech Republic

strielkowski@gmail.com

Abstract: The development of energy storage and storage systems is becoming a potential method for solving the problems of the global energy system. However, there are technical and non-technical barriers to the widespread distribution of energy storage devices. In this regard, it is necessary to identify innovative processes, mechanisms and systems that allow developments in the field of energy storage to contribute to solving the problems of the energy system, as well as to ensure industrial growth at the expense of companies engaged in the development of technologies. This article discusses current advances and trends in energy

storage innovation. The scientific novelty of the article consists in a comprehensive review of the current state of affairs in this area and the determination of the main directions of development.

Keywords: *energy storage; storage device; batteries; energy policy.*

For citation: Mukhametova LR, Akhmetova IG, Strielkowski W. Innovations in energy storage. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019; 21(4):33-40. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40.

Введение

С экономической точки зрения стоимость, полученную от хранения дешевой или свободной энергии (то есть энергии, полученной из возобновляемых источников энергии в периоды внепикового или низкого потребления, которая может быть продана в часы пиковой нагрузки, приходящиеся, в основном, на вторую половину дня), можно рассчитать, определив разницу в рыночной цене в разные периоды времени. Таким образом, энергия, полученная из возобновляемых источников энергии и сохраненная в аккумуляторах в периоды внепикового потребления, может быть использована в периоды пикового потребления. В отличие от них, использование энергии невозобновляемых источников, таких как турбины, работающие на природном газе, стоит дороже. Для того чтобы получить полное представление о последствиях использования таких технологий при проведении строгого анализа, необходимо рассмотреть вопрос о негативном воздействии загрязнений на окружающую среду. Может случиться так, что, несмотря на экологические преимущества, связанные с накоплением энергии, одновременно может оказываться неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Например, можно не останавливать ветряные электростанции в ночное время, поскольку вырабатываемая электроэнергия может быть накоплена. При этом угольные электростанции также могут продолжать работать ночью, так как выработанная ими энергия также может быть сохранена, что приводит к общему эффекту небольшого увеличения общего количества загрязнения окружающей среды (Jacobsen, 2016).

Электрическая энергия может быть преобразована во множество различных форм для хранения. К распространенным формам относятся преобразование и хранение энергии в виде: гравитационной потенциальной энергии в водяных резервуарах, энергии сжатого воздуха, электромеханической энергии в батареях и проточных батареях, химической энергии в топливных элементах, кинетической энергии в маховиках и магнитной энергии в индукторах и электрическом поле в конденсаторах. Использование крупномасштабных систем накопления энергии, таких как насосные гидроаккумуляторы (*pumped hydro storage* – *PHS*), которые основаны на хранении электрической энергии в качестве гравитационной потенциальной энергии воды, включает в себя перекачку воды из нижнего резервуара в верхний в периоды внепикового потребления. Вода, в свою очередь, высвобождается для перетока в нижние резервуары в часы пик, и таким образом запускает водяные турбины, в конечном итоге генерирующие электроэнергию. Существует пропорциональная зависимость между накопленной энергией, объемом воды в верхнем резервуаре и высотой водопада. Установки *PHS* обычно служат от 30 до 50 лет и, как было определено, имеют приемлемую энергоэффективность полного цикла (*round trip efficiency*) от 65 до 75 процентов. Они также имеют быстрое время отклика (менее одной минуты), несмотря на управление большими объемами энергии и мощности, что делает их пригодными для регулирования частоты электрической сети и обеспечения резервной генерации энергии (Díaz-González et al., 2012).

Системы хранения энергии на основе сжатого воздуха (*Compressed Air energy storage* – *CAES*) основаны на хранении энергии в виде сжатого воздуха в подземных хранилищах. Таким образом, они основаны на использовании обычных газовых турбин. Во время пиковых часов потребления, требующих, как правило, поступления большего количества электроэнергии в сеть, сжатый воздух, смешанный с природным газом, извлекают из хранилищ, нагревают и запускают в газотурбинные установки высокого и низкого давления. Это преобразует энергию сжатого воздуха в кинетическую энергию. Турбины, в свою очередь, запускают электрогенераторы, в то время как выхлопы из турбин используются для нагревания сжатого воздуха из хранилищ. Однако эта технология не получила широкого применения во всем мире. Примеры включают одну установку в Германии с мощностью 290 МВт и еще одну в США мощностью 110 МВт.

Совершенствование технологии привело к созданию улучшенных адиабатических систем CAES (*Advanced Adiabatic CAES* – AA-CAES), которые основаны на адиабатном сжатии расширенного воздуха и последующем закачивании его на хранение в цистерны подземного хранилища. Этот метод влечет использование теплообменников, которые имеют более высокую стоимость, однако существенно увеличивают эффективность, результативность и экономичность. Они показали свою высокую эффективность в ходе испытаний их компрессоров и расширителей. По оценкам срок службы систем CAES составляет не менее 40 лет при уровне энергоэффективности 71 процент. Из-за очень низкого уровня саморазряда внутри системы они рассматриваются в качестве долгосрочных конкурентов PHS (Lu et al., 2004).

Аккумуляторные системы накопления энергии

Наиболее распространенными технологиями, применяемыми при хранения энергии, являются аккумуляторные системы накопления энергии (*battery energy storage system* – BESS). Эта технология включает комплект или несколько комплектов взаимосвязанных ячеек, соединенных последовательно, параллельно или обоими способами с целью получить определенное значение напряжения или емкости (Divya u Østergaard, 2009). В данных системах энергия хранится в виде электрохимической энергии. Электроды, которые обычно сделаны из проводниковых материалов, помещены в специальный содержащий электролит герметичный контейнер, обеспечивая таким образом внешнюю нагрузку (Winter and Brodd, 2004). Через электролит происходит обмен ионов между электродами, в то время как электроны протекают через внешний контур. Этот метод основан на использовании энергетических аккумуляторных блоков, производящих более низкие напряжения, которые, будучи соединенными в цепь с параллельной или последовательной схемой соединения, достигают желаемых свойств и уровня производства электроэнергии. Как правило, BESS состоит из аккумуляторных батарей, системы управления и регулирования мощности (*Control and Power Conditioning System* – C-PCS) и защитного устройства для всей системы (Suberu и соавт., 2014). Различные типы используемых батарей включают свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, никель-кадмиевые и литий-ионные батареи. Свинцово-кислотные батареи используются самое длительное время на протяжении около 140 лет. Эти батареи бывают двух типов: обычно применяемые аккумуляторные батареи с жидким электролитом (*flooded batteries*), и аккумуляторные батареи с регулируемым клапаном (*valve regulated batteries*), которые в настоящее время разрабатываются и совершенствуются.

Они имеют период эксплуатации от 1200 до 1800 циклов разрядки, который зависит от глубины разряда; энергоэффективность полного цикла (*round trip efficiency*) от 75 до 80 %, а срок службы от 5 до 15 лет в зависимости от рабочей температуры (Dufo-Lonec, 2015). Их лучше использовать для хранения энергии в течение длительного времени. Однако они часто демонстрируют низкую эффективность при высоких и низких температурах окружающей среды и имеют довольно короткий срок службы. Они также со временем требуют восполнения уровня воды, особенно это касается батарей с жидким электролитом. Усилия были направлены на то, чтобы никель-кадмиевые и литий-ионные батареи стали предпочтительным вариантом выбора, особенно с точки зрения их стоимости. Никель-кадмиевые аккумуляторы включают щелочные перезаряжаемые батареи, которые часто классифицируют в зависимости от сферы применения (Hadjipaschalis et al. 2009.). Они находятся либо в загерметизированной форме, которая часто используется на переносном электрическом оборудовании, либо в форме с жидким электролитом, используемой в промышленных применениях. Этот тип батареи имеет довольно длинный период эксплуатации: больше чем 3500 циклов и несложное обслуживание. Однако они токсичны из-за использования в производстве тяжелых металлов, представляющих опасность для здоровья и окружающей среды, и часто имеют недостаток в виде так называемого «эффекта памяти». Литий-ионные (*Li-Ion*) аккумуляторы, с другой стороны, обычно применяются в современных электронных устройствах, таких как мобильные телефоны и электронные устройства, требующие минимума энергии. Литий-ионные аккумуляторы имеют высокую удельную энергоемкость и удельную энергию между 75 до 125 Вт.ч/кг. К тому же они демонстрируют способность быстро заряжаться и разряжаться, а также иметь высокую эффективность полного цикла: 78 % в течение 3500 циклов. Эти аккумуляторы не могут использоваться для систем резервного питания из-за их срока службы, который зависит от глубины разряда (Young et al., 2013).

Система хранения энергии с использованием проточных аккумуляторных батарей (*Flow battery energy storage system* – FBESS) представляет собой новую технологию, основанную на использовании обратимых электрохимических реакций для получения

желаемого выходного напряжения тока. В этом типе аккумуляторной батареи используются два различных водных раствора, помещенных в отдельные емкости для хранения. Имеющиеся в продаже виды включают ванадиевые редокс-аккумуляторные батареи (*Vanadium Redox Battery – VRB*), цинко-бромные батареи (*Zinc Bromine Battery – ZBB*) и полисульфидные бромидные батареи (*Polysulphide Bromide Battery – PBB*). Проточные аккумуляторные батареи способны давать энергию без причинения какого-либо вреда и имеют относительно низкий уровень саморазряда. Они также имеют длительный срок эксплуатации, не требуют постоянного обслуживания, обладают легко масштабируемой мощностью в зависимости от объема хранящегося электролита, а также способны хранить энергию на протяжении длительного периода времени (*Chen et al.*, 2009).

Другие системы хранения энергии

Водородная система накопления энергии (*Hydrogen-based energy storage system – HESS*) основана на возможности различных методов и средств извлечения водорода, который потом можно хранить и использовать (позднее либо сразу). Различные способы получения водорода включают электролиз воды, возобновляемые источники энергии и газификацию биомассы, угля или топлива, что обычно является наиболее распространенным методом. Хранение водорода, как правило, предполагает использование технологий восстановления топливных элементов (*Regenerative Fuel Cell technologies – RFC*), которые обычно влекут электрохимические превращения формы водорода и позднее вводятся в национальные или региональные сети в форме электричества (*Zhao et al.*, 2014). Для *RFC* необходимы: системы электролиза воды для электрохимического разложения воды на водород и кислород; система топливных элементов; система хранения водорода и система преобразования электроэнергии. Устройства для электролиза (электролизеры) бывают различных видов, а именно: применяемые в настоящее время щелочные электролизеры и полимерно-электролитная мембрана (*Polymer Electrolyte Membrane – PEM*). В состав *RFC* обычно входят топливные элементы, благодаря их хорошим динамическим свойствам, быстрому запуску и, как правило, отсутствию акустических выбросов при работе. Единственным побочным продуктом является сливная отработанная вода. Учитывая, что технология *RFC* основана на технологии проточных аккумуляторных батарей, их мощность и энергоемкость не зависят друг от друга. Благодаря их модульной конструкции, они имеют высокую пиковую мощность: более 10 МВт, для систем высокой мощности – более 100 МВт час. Они также имеют нулевой саморазряд, что позволяет хранить энергию длительные промежутки времени – около 15 лет. Однако эта система имеет низкую эффективность – около 42 % (*Soloveichik*, 2011).

Система хранения энергии маховика (*Flywheel energy Storage system – FESS*) представляет собой хранение энергии в кинетической форме: масса вращается на двух магнитных подшипниках, с целью уменьшения трения при высоких скоростях, совместно с электрическим генератором (*Akagi and Sato*, 2002). Во время работы генератора и вращения его двигателя происходит передача энергии к маховику, в результате чего происходит его ускорение и, таким образом, зарядка накопительного устройства. Такая технология часто используется в магнитоэлектрических машинах радиального или осевого потока и синхронизированных реактивных электроиндукционных машинах. *FESS*, как правило, имеет много преимуществ, включая высокую эффективность: около 90 % при номинальной мощности, длинный жизненный цикл, широкий диапазон рабочей температуры, отсутствие влияния глубины разрядки, более высокую мощность и энергоемкость. Они, однако, не лишены и недостатков, таких как относительно высокие потери при простое и саморазряд на 20 % от накопленной энергии за час для всей системы маховика, что делает их совершенно неподходящими для долгосрочного хранения электроэнергии (*Vazquez et al.* 2010).

Другой технологией, разработанной для хранения энергии, является суперпроводниковое магнитное накопление энергии (*superconducting magnetic energy storage – SMES*), которое является новейшей технологией. Оно предполагает хранение энергии в магнитном поле в результате прохождения постоянного тока через сверхпроводящую катушку при криогенных температурах. Эта система включает в себя использование сверхпроводящих катушек, которые могут быть сгруппированы в высокотемпературные катушки (*high temperature coils – HTC*) с рабочей температурой около 70 К и низкотемпературные катушки с рабочей температурой около 5 К. При решении вопроса о том, какая технология лучше всего подходит для использования, важно чтобы были сбалансированы как стоимость, так и системные требования. Эта система способна достигать высокой энергоемкости, близкой к показателям, получаемым в маховиках и обычных батареях. Она также характеризуется высоким уровнем

энергоэффективности до 90 %, а также очень длинным периодом эксплуатации, достигающим десятков тысяч циклов. Также эта система способна сгенерировать или поглотить большое количество энергии за очень короткое время. Вместе с тем, из-за высокой стоимости системы, капитальные затраты на которую составляют от 1000 до 10 000 долл./кВт, было создано очень мало таких объектов (*Noe and Steurer, 2007*).

Экономические последствия накопления энергии

Накопление энергии является перспективным полем прикладных исследований будущего для достижения больших целей (*Ciamician, 2012*). Многие люди понимают, что доступные системы хранения энергии являются недостающим звеном между альтернативной возобновляемой энергетикой, основанной на таких источниках, как энергия ветра и солнца, и ее ежедневной надежностью. Во всем мире предприятия заинтересованы в возможности хранения запасов энергии для удовлетворения других потребностей, таких как сокращение отключений и устранение колебаний мощности, которые происходят независимо от производства возобновляемой энергии (*Urbaniec, 2015*). Крупные производители техники признают хранение энергии прикладной наукой, которая может изменить автомобили, турбины и потребительскую автоматику.

Другие исследователи, тем не менее, придерживаются более скептической позиции, понимая, что хранение энергии не станет перспективной деятельностью в ближайшее время. Эту неопределенность нельзя не принимать во внимание. Уже в течение долгого времени рассматривается вопрос о трансформационной перспективе хранения энергии, однако и в настоящее время хранение энергии имеет малую долю (*Gallagher, 2009*). В 2015 году были установлены рекордные объемы емкости хранения – 221 мегаватт емкости хранения, что более чем в три раза больше, чем в 2014 году – 65 мегаватт, что само по себе означало значительный рост по сравнению с предыдущим годом (*Fertig and Apt, 2011*). Однако более 100 мегаватт 2015 года было использовано частной местной передающей корпорацией *PJM Interconnection*. *PJM* обслуживает штаты: Иллинойс, Делавэр, Кентукки, Индиана, штат Мэриленд, Нью-Джерси, Мичиган, Огайо, штат Северная Каролина, Теннесси, Пенсильвания, Вирджиния, Западная Вирджиния и Вашингтон, округ Колумбия. Кроме того, 221 мегаватт – это не так уж много, учитывая полную производственную мощность США более миллиона мегаватт.

Когда появляются установки и перспектива для хранения энергии для 10 ведущих стран мира, становится очевидным, что, хотя Китай имеет большую часть установленной мощности, он отстает от Соединенных Штатов и Японии по ряду проектов (*DOE Global Energy Storage Database, 2016*).

Исследования раскрывают значительную краткосрочную возможность стационарного хранения электроэнергии. Одно из заключений состоит в том, что цены падают и могут приблизиться к \$ 200 за киловатт-час в 2020 году – это половина от сегодняшней цены; и составить \$ 160 за киловатт-час или меньше в 2025 году (*Lundmark u Bäckström, 2015*). Другое дело, что исследование наиболее эффективных аспектов и групп потенциальных потребителей в отношении хранения энергии показало смещение интереса в сторону определенного круга организаций, включающих: поставщиков электроэнергии, инженерные компании электросетей, производителей аккумуляторных батарей, интеграторов хранения энергии и предприятия со встроенными связями с потенциальными клиентами, такими как энергосервисные компании и разработчики солнечной энергии. Это особенно важно в отношении растущей доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и целевых показателей ВИЭ, установленных ЕС (*Eurostat, 2016*). Инновации в области накопления энергии имеют решающее значение для содействия этому росту.

Необходимо устанавливать планы и идентифицировать клиентов. Это позволяет понимать, как используется энергия и сколько она стоит, а также дает представление о стоимости хранения энергии. Однако слишком часто предприятия, которые имеют доступ к информации об использовании энергии, не имеют достаточных знаний о том, как оценивать экономику хранения; те же, кто понимает эту экономику, имеют недостаточный доступ к фактическим мировым данным об использовании энергии. Кроме того, существует склонность отождествлять некоторые данные при проведении анализа. Агрегирование оценок, тем не менее, нецелесообразно при оценке преимуществ хранения энергии, поскольку одинаковые структуры по соседству друг с другом могут иметь совершенно разные модели использования энергии. Выводы, сформированные на основе средних данных, следовательно, не обладают уровнем точности, необходимым для определения того, каких потребителей было бы целесообразно обслуживать.

Выводы и мнения

В заключение становится очевидным, что из вышеизложенного можно сделать несколько существенных выводов.

Во-первых, хранение энергии теперь имеет экономическую обоснованность для специфического использования. Этот пункт иногда игнорируется в связи с важностью сборов, платежей за некоторые схемы хранения энергии и неэкономических или трудноизмеримых финансовых оснований для хранения (таких как эластичность и защита от перебоев в подаче электроэнергии).

Во-вторых, участникам рынка необходимо получить полные данные, которые могли бы позволить им различать и выделять приоритетные группы потребителей, для которых хранение полезно. Учитывая сложность хранения энергии, для развертывания системы более разумно применить политику «толчка», нежели модель постепенного «растягивания», поддерживать предпринимательские усилия, которые находят новаторские способы получения и использования этих данных.

В-третьих, поставщики систем хранения энергии должны быть открытыми и непредвзятыми в своем видении картины развития отрасли и при определении того, будут ли свинцово-кислотные, литий-ионные, проточные или иные технологии представлять наибольшую ценность. Подход, совмещающий различные технологии, может быть связан с дополнительными расходами, однако он также может защитить от неожиданного повышения цен.

В-четвертых, ожидается, что фирмы, использующие аккумуляторные системы и загружающие данные, накопят здоровые объемы. Отдельные индивидуальные потребители будут поддерживать индивидуальные стратегии, обеспечивая развитие «алгоритмов», которые помогают находить и получать наибольшую ценность. Для получения последовательных данных и наиболее экономически обоснованной реакции по мере развития законов и технологий необходимы сильные объединения потребителей.

В-пятых, для того, чтобы использовать хранение для снижения общесистемных расходов, необходимы определенные знания.

Модели могут включать в себя ценовые сигналы, которые связаны с заметными различиями в производстве и потреблении электроэнергии, практики, которые вознаграждают предоставление хранения энергии для оказания помощи различным объектам в непосредственной близости, и сборы, которые благоприятствуют самостоятельному потреблению (или перемещению нагрузки) возобновляемой энергии.

Наиболее существенная взаимосвязь заключается в следующем: крупномасштабное распределение накопителей энергии может нарушить рынок, привычный для некоторых предприятий электроэнергетики. В развитых странах, например, центральное или массовое производство традиционно используется для удовлетворения непосредственного спроса, при этом дополнительная помощь служит для сглаживания несоответствий между производством электроэнергии и нагрузкой. Хранение энергии хорошо подходит для того, чтобы предоставить такую «дополнительную помощь». В конечном счете, по мере падения цен, оно может выйти за рамки этой функции, производя и подавая в электросеть все больше и больше энергии, заменяя, таким образом, традиционные электростанции. Но необходимо знать, что процесс хранения энергии способен перевернуть бизнес-структуры, как экономические, так и физические, которые сформировали энергетический бизнес за последнее столетие.

Литература

1. Akagi H., Sato H. Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002. V.17.N.1.pp. 109–116.
2. Chen H., Cong T.N., Yang W., Tan,C., Li Y., Ding Y // *Progress in electrical energy storage system: A critical review*. Progress in Natural Science.2009. V.19. N.3. pp. 291–312.
3. Ciamician G. (1912). The photochemistry of the future. *Science*. P. 385–394.
4. Díaz-González F., Sumper A., Gomis-Bellmunt O., Villafañila-Robles R. A review of energy storage technologies for wind power applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. V.16. N.4. pp. 2154–2171.
5. Divya K.C., Ostergaard J. Battery energy storage technology for power systems. An overvie // *Electric Power Systems Research*. 2009. V.79.N.4. pp. 511–520.
6. DOE Global Energy Storage Database. (2016), Available at: <http://www.energystorageexchange.org/>.
7. Dufo-López R. Optimisation of size and control of grid-connected storage under real time electricity pricing conditions // *Applied Energy*. 2015. V.140. pp. 395–408.

8. Eurostat. (2016), Simplified energy balances – annual data. Available at: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_100a&lang=en.
9. Fertig E., Apt J. Economics of compressed air energy storage to integrate wind power: A case study in ERCOT // *Energy Policy*. 2011. V.39. N.5. pp. 2330–2342.
10. Gallagher K. (2009). *Acting in time on energy policy*. Washington, D.C.: Brookings Institution Press
11. Hadjipaschalis I., Poullikkas A., Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2009. V.13(6). pp. 1513–1522.
12. Jacobsen M. // *Economics and Policy of Large Scale Battery Storage*. Kleinman Center for Energy Policy, University of Pennsylvania. 2016. Available at: <http://kleinmanenergy.upenn.edu/policy-digests/economics-and-policy-large-scale-battery-storage>.
13. Lu N., Chow J.H., Desrochers A.A. Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004. V.19. N2. pp. 834–841.
14. Lundmark R. Bäckström K. Bioenergy innovation and energy policy. *Economics Of Innovation And New Technology*. 2015. V.24. N8. pp. 755–775.
15. Noe M., Steurer M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status // *Superconductor Science and Technology*. 2007. V.20(3). R15.
16. Soloveichik G.L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage // *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 2011. V.2. pp. 503–527.
17. Suberu M.Y., Mustafa M.W., Bashir N. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. V.35. pp. 499–514.
18. Urbaniec M. Towards Sustainable Development through Ecoinnovations: Drivers and Barriers in Poland, *Economics and Sociology*. 2015. Vol.8. N.4. pp. 179–190.
19. Vazquez S., Lukic S.M., Galvan E., Franquelo L.G., Carrasco J.M. Energy storage systems for transport and grid applications // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. V.57. N.12. pp. 3881–3895.
20. Winter M., Brodd R.J. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? // *Chemical reviews*. 2004. V. 1.104. N.10. pp. 4245–4270.
21. Young K., Wang C., Wang L.Y., Strunz K. // *Electric vehicle battery technologies*. In *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks* 2013. pp. 15–56. Springer New York.
22. Zhao P., Dai Y., Wang J. Design and thermodynamic analysis of a hybrid energy storage system based on A-CAES (adiabatic compressed air energy storage) and FESS (flywheel energy storage system) for wind power application // *Energy*. 2014. 70. pp. 674–684.

Авторы публикации

Мухаметова Лилия Рафаэльевна – канд. экон. наук, доцент кафедры «Экономика и организация производства» (ЭОП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ахметова Ирина Гареевна – д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Экономика и организация производства» (ЭОП), директор Института цифровых технологий и экономики Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Стриелковски Вадим – д-р экон. наук, профессор, директор Пражского института повышения квалификации.

References

1. Akagi H., Sato H. Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002;17(1):109–116.
2. Chen H., Cong T.N., Yang W., Tan, C., Li Y., Ding Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*. 2009;19(3):291–312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
3. Ciamician, G. (1912). The photochemistry of the future. *Science*. P. 385–394.
4. Díaz-González F., Sumper A., Gomis-Bellmunt O., Villafila-Robles R. A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012; 16(4):2154–2171.
5. Divya K.C., Østergaard J. Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research*. 2009; 79(4):511–520. doi: 10.1016 / j.epsr.2008.09.017.

6. DOE Global Energy Storage Database. 2016. Available at: <http://www.energystorageexchange.org/>.
7. Dufo-López R. Optimisation of size and control of grid-connected storage under real time electricity pricing conditions. *Applied Energy*. 2015; 140: 395–408.
8. Eurostat. (2016), Simplified energy balances – annual data. Available at: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_100a&lang=en.
9. Fertig E., Apt J. Economics of compressed air energy storage to integrate wind power: A case study in ERCOT. *Energy Policy*. 2011;39(5):2330–2342.
10. Gallagher K. *Acting in time on energy policy*. Washington, D.C.: Brookings Institution Press. 2009.
11. Hadjipaschalis I., Poullikkas A., Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2009;13(6): 1513–1522.
12. Jacobsen M. *Economics and Policy of Large Scale Battery Storage*. Kleinman Center for Energy Policy, University of Pennsylvania. Available at: <http://kleinmanenergy.upenn.edu/policy-digests/economics-and-policy-large-scale-battery-storage>. 2016.
13. Lu N., Chow J.H., Desrochers A.A. Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004;19(2):834–841.
14. Lundmark R. Bäckström K. Bioenergy innovation and energy policy. *Economics Of Innovation And New Technology*. 2015; 24(8): 755–775. <https://doi.org/10.1080/10438599.2014.998862>.
15. Noe M., Steurer M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. *Superconductor Science and Technology*. 2007;20(3):15. doi: 10.1088 / 0953-2048 / 20/3 / R01.
16. Soloveichik G.L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 2011;2:503–527. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116>.
17. Suberu M.Y., Mustafa M.W., Bashir N. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 35:499–514. doi: 10.1016 / j.rser.2014.04.009.
18. Urbaniec M. Towards Sustainable Development through Ecoinnovations: Drivers and Barriers in Poland. *Economics and Sociology*. 2015;8(4):179–190. doi: 10.14254/2071-789X.2015/8-4/13
19. Vazquez S., Lukic S.M., Galvan E., Franquelo L.G., Carrasco J.M. Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010; 57(12):3881–3895. doi: 10.1109/TIE.2010.2076414.
20. Winter M., Brodd R.J. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical reviews*. 2004; 104(10): 4245–4270.
21. Young K., Wang C., Wang L.Y., Strunz K. Electric vehicle battery technologies. In *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks* 2013:15–56. Springer New York.
22. Zhao P., Dai Y., Wang J. Design and thermodynamic analysis of a hybrid energy storage system based on A-CAES (adiabatic compressed air energy storage) and FESS (flywheel energy storage system) for wind power application. *Energy*. 2014;70:674–684. doi: 10.1016 / j.energy.2014.04.055.

Authors of the publication

Liliya R. Mukhametova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Irina G. Akhmetova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Wadim Strielkowski – Prague Institute for Qualification Enhancement, Prague Czech Republic.

Поступила в редакцию

18 апреля 2019 г.



РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ ЖИДКОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Г.А. Муратаева, И.А. Муратаев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0195-3116> , esis00@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-3727-5035> , goldenesis@mail.ru

Резюме: Целью работы является исследование диэлектрических характеристик масла на растительной основе в процессе циклического температурного старения и определении параметров, необходимых для контроля состояния масла, и разработке метода диагностики электроизоляционной жидкости. Методика исследования включала измерение диэлектрической проницаемости масла и тангенса угла диэлектрических потерь для образца масла, которое подвергалось циклическому температурному окислению. Тепловое окисление заключалось в циклическом нагревании и естественном остывании образца в течение суток без воздействия света. Таким образом, выполнялась имитация изменения температурного режима в баке силового трансформатора при изменяющемся графике нагрузки в течение суток. Для сравнения измерялась диэлектрическая проницаемость базового подсолнечного масла, которое хранилось в стеклянной таре при комнатной температуре без воздействия света. Результаты исследования показали, что диэлектрическая проницаемость масла на растительной основе линейно увеличивается в процессе окисления. Увеличение диэлектрической проницаемости связано с ростом числа полярных молекул в результате образования вторичных продуктов окисления. Температурное воздействие приводит к химическому изменению состава масла. В результате образуются первичные продукты окисления – гидроперекиси. Гидроперекиси при высокой температуре нестабильны и быстро разрушаются с образованием вторичных продуктов окисления. Продукты окисления масла на растительной основе не образуют осадка. Вместо этого масло начинает густеть и полимеризуется. Разработанный метод диагностики состояния электроизоляционной жидкости заключается в определении коэффициента, пропорционального скорости роста числа полярных молекул, образующихся при окислении масла. Полученные результаты показывают, что контроль только тангенса угла диэлектрических потерь не дает полной картины состояния масла на растительной основе и не всегда является индикатором окислительных процессов в масле. Процесс термического окисления оказывает устойчивое влияние на величину диэлектрической проницаемости, которая указывает на изменения в молекулярном составе масла, в результате полимеризации.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, температурное окисление, масло на растительной основе, метод диагностики.

Для цитирования: Муратаева Г.А., Муратаев И.А. Разработка метода диагностики электроизоляционной жидкости трансформаторного электрооборудования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №4. С.41-47. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-41-47.

DEVELOPMENT OF DIAGNOSTICS METHOD OF ELECTRICAL-INSULATING LIQUID OF TRANSFORMER EQUIPMENT

GA. Murataeva, IA. Murataev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0195-3116> , esis00@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-3727-5035> , goldenesis@mail.ru

Abstract: The work is to research the dielectric characteristics of vegetable-based oil during cyclic temperature aging and to determine the parameters necessary for monitoring the state of the oil, and to develop a method for diagnosing an insulating liquid. The research technique included measuring the dielectric constant of the oil and the tangent of dielectric loss for oil that underwent cyclic temperature oxidation. Thermal oxidation consisted in cyclic heating and natural cooling of the sample during the day without exposure to light. This was done to simulate changes of the temperature in the tank of the power transformer with a changing load schedule during the day. For comparison, the dielectric constant of the base sunflower oil was measured, which was stored in a glass container at room temperature without exposure to light. The results showed that the dielectric constant of vegetable-based oil increases linearly in the oxidation process. The increase in permittivity is associated with an increase in the number of polar molecules as a result of the formation of secondary oxidation products. Under the influence of temperature, the chemical composition of the oil changes and the primary oxidation products — hydroperoxides — are formed. Vegetable-based oil oxidation products do not form a precipitate. Instead, the oil begins to thicken and polymerize. The developed method of diagnosing of an insulating liquid is to determine a coefficient proportional to the growth rate of the number of polar molecules in oil. The results show that monitoring only the tangent of dielectric losses does not give information of the state of vegetable-based oil and is not always an indicator of oxidative processes in oil. The thermal oxidation process has a steady effect on the dielectric constant, which indicates changes of the oil as a result of polymerization.

Keywords: dielectric constant, thermal aging, natural oil, diagnostic method.

For citation: Murataeva GA, Murataev IA. Development of diagnostics method of electrical-insulating liquid of transformer equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):41-47. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-41-47.

Введение

Надежность работы электроэнергетической системы во многом зависит от безаварийной работы силового трансформаторного оборудования электрических станций и подстанций. В работе маслонеполненного трансформаторного оборудования важной составляющей является трансформаторное масло, которое выполняет функции электрической изоляции, а также охлаждения магнитопровода и обмоток трансформатора. Следовательно, диагностика состояния трансформаторного масла является важной задачей. Большая часть трансформаторных масел производится из продуктов нефтепереработки. Такие масла являются пожароопасными и вредными для экологии. В настоящее время активно решается вопрос замены нефтяных электроизоляционных масел экологически чистыми биоразлагаемыми изоляционными жидкостями на основе растительных масел [1–5]. Вопросам диагностики диэлектрических характеристик биоразлагаемых масел в процессе эксплуатации посвящено небольшое число исследований [6–10]. В этой связи актуальным является вопрос разработки метода диагностики электроизоляционной жидкости на растительной основе.

Цель работы заключается в исследовании диэлектрических характеристик масла на растительной основе в процессе циклического температурного старения, определении параметров, необходимых для контроля состояния масла, и разработке метода диагностики электроизоляционной жидкости. В исследовании использовалось подсолнечное масло высшего сорта по ГОСТ 1129-2013. Сравнивая различные виды растительных масел по содержанию ненасыщенных жирных кислот, для исследований было выбрано подсолнечное масло высшего сорта, имеющее устойчивость к окислению выше, чем других растительных масел, а также имеющее схожие диэлектрические характеристики с трансформаторными маслами. Кроме того, подсолнечное масло является биологически перерабатываемым и легко утилизируемой электроизоляционной жидкостью, обладает высокой термической устойчивостью и имеет значительно более высокую температуру горения, чем у минеральных масел.

Методика исследования

Метод диагностики диэлектрических характеристик изоляции трансформаторного масла основан на принципе измерения составляющей вектора тока, находящегося в фазе с управляющим напряжением (рис. 1).

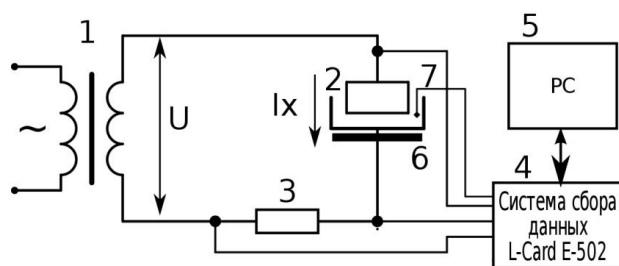


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки: 1 – испытательный трансформатор; 2 – стандартная измерительная ячейка (ГОСТ 6581-75); 3 – шунт измерительный; 4 – система сбора данных L-Card E-502; 5 – персональный компьютер; 6 – нагреватель; 7 – датчик температуры

Измеряемые значения тока и напряжения с помощью системы сбора данных *L-Card E-502* передаются в персональный компьютер, где выполняется обработка по принципу синхронного выпрямления. Если ток находится в фазе с напряжением на измерительной ячейке U , то среднее значение тока I_x будет пропорционально активной составляющей тока через измерительную ячейку с диагностируемым маслом:

$$I_a = I_x \cdot \cos \varphi,$$

где I_x – ток через измерительную ячейку.

При сдвиге фазы тока на 90° относительно напряжения на измерительной ячейке ток будет соответствовать реактивной составляющей:

$$I_r = I_x \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = I_x \cdot \sin \varphi.$$

При измерении реактивной составляющей тока получаемые значения будут пропорциональны емкости измерительной ячейки с диагностируемым образцом масла.

Диэлектрическая проницаемость электроизоляционной жидкости определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{I_r}{I_{r0}},$$

где I_{r0} – реактивная составляющая тока через пустую ячейку; A , I_r – реактивная составляющая тока через ячейку с исследуемым образцом масла, A .

Отношение этих величин позволяет определить тангенс угла диэлектрических потерь исследуемого масла [11]:

$$\frac{I_a}{I_r} = \operatorname{tg} \varphi.$$

Диэлектрическая проницаемость масла и тангенс угла диэлектрических потерь измерялись для образца масла, которое подвергалось циклическому температурному окислению. Суммарное время эксперимента составило 360 часов. Технология теплового окисления заключалась в циклическом нагревании до 120°C и естественном остывании образца до 25°C в течение 24 часов без воздействия света. Таким образом, выполнялась имитация изменения температурного режима в баке силового трансформатора при изменяющемся графике нагрузки в течение суток. Так же измерялась диэлектрическая проницаемость базового подсолнечного масла, которое хранилось в стеклянной таре при температуре 25°C без воздействия света. Измерения диэлектрических характеристик проводились на частоте питающего напряжения 50 Гц и температуре масла 25°C [12, 13].

Основные результаты и обсуждение

График изменения диэлектрической проницаемости масла на растительной основе в процессе циклического температурного окисления в течение 360 часов показан на рис. 2. Для сравнения на рис. 2 приведен график изменения диэлектрической проницаемости базового масла, которое не подвергалось температурному воздействию. Из полученных данных следует, что диэлектрическая проницаемость масла на растительной основе линейно увеличивается в процессе окисления. Увеличение диэлектрической проницаемости связано с ростом числа полярных молекул в результате образования вторичных продуктов окисления.

Температурное воздействие приводит к химическому изменению состава масла на растительной основе в процессе окисления. В результате образуются первичные продукты окисления – гидроперекиси. Гидроперекиси при высокой температуре нестабильны и быстро разрушаются с образованием вторичных продуктов окисления. К вторичным

продуктам окисления относятся альдегиды, кетоны, спирты, короткоцепочечные углеводороды и нелетучие полярные соединения [14, 15].

Продукты окисления масла на растительной основе не образуют осадка. Вместо этого масло начинает густеть и, в конечном счете, полимеризуется. В процессе термической полимеризации постепенно образовывается трехмерная структура, что приводит к желатинизации масла. Полимеризация масла в процессе работы приводит к повреждению оборудования, так как увеличивается вязкость масла, что ухудшает процесс охлаждения вплоть до полного прекращения циркуляции масла.

В качестве примера на рис. 2 показан график изменения тангенса угла диэлектрических потерь масла на растительной основе, подверженного температурному воздействию. Тангенс угла диэлектрических потерь в процессе окисления изменяется незначительно, что связано с одновременным увеличением диэлектрической проницаемости и удельной проводимости масла. Величина удельной проводимости масла на растительной основе связана с переносом заряда ионами, возникающими при диссоциации молекул примесей и продуктов окисления. В процессе окисления растет полярность масла, что увеличивает степень диссоциации молекул. Удельная проводимость окисленного масла на растительной основе при этом увеличивается. Таким образом, однозначно выявить процесс старения электроизоляционной жидкости на растительной основе по значениям тангенса угла диэлектрических потерь затруднительно.

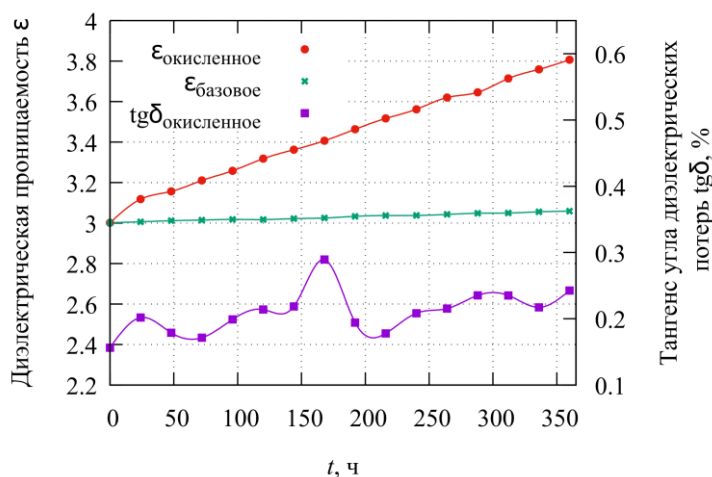


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости образца при температуре 25°C от длительности циклического температурного окисления

Разработанный метод диагностики состояния электроизоляционной жидкости заключается в определении коэффициента K_v , пропорционального скорости роста числа полярных молекул, образующихся при окислении масла. Измеряя диэлектрическую проницаемость масла каждые 24 часа, рассчитывается диагностический коэффициент K_v по формуле

$$K_v = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i-1}},$$

где ε_i — предыдущее значение диэлектрической проницаемости; ε_{i-1} — текущее значение диэлектрической проницаемости.

Изменение коэффициента для окисляемого и базового масла показано на рис 3. На графике видны два события резкого изменения коэффициента K_v . Первое изменение (0–70 часов) вызвано появлением в масле продуктов разрушения гидроперекисей вследствие воздействия высокой температуры, что привело к образованию большого числа полярных молекул, которые вызвали увеличение диэлектрической проницаемости масла. При этом продукты окисления привели к увеличению вязкости масла, подвергнутого температурному воздействию. Значение кинематической вязкости масла перед температурным окислением было равно 49,78 мм²/с, через 70 часов оно составило 99,27 мм²/с. Второе изменение (250–350 часов) связано с формированием трехмерной структуры и желатинизацией масла. При этом в исследуемом масле сформировались липкие студнеобразные частицы, число которых со временем увеличивалось. Вязкость масла, не перешедшего в состояние желатинизации, была равна 125,56 мм²/с.

Из полученных данных следует, что, выполняя постоянный контроль значения диэлектрической проницаемости масла и определяя коэффициент K_V , можно диагностировать изменение состояния диэлектрической жидкости, вызванное окислительными процессами, и выявлять начало процесса полимеризации.

Проведенные исследования показали, что при естественном старении масла на растительной основе изменение коэффициента K_V за 24 часа не превышает 0,5 %. Увеличение коэффициента K_V более чем на 1 % является признаком химического изменения масла и началом процесса его полимеризации.

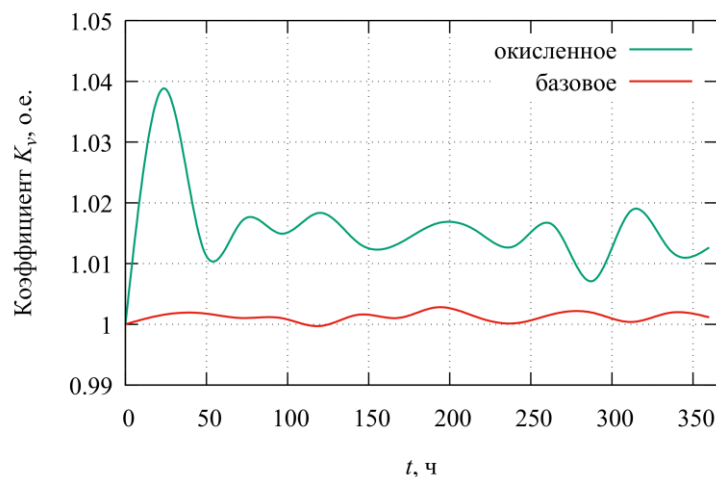


Рис. 3. Изменение диагностического параметра K_V при циклическом тепловом окислении масла

Выводы

Полученные результаты показывают, что контроль только тангенса угла диэлектрических потерь не дает полной картины состояния масла на растительной основе и не всегда может являться индикатором окислительных процессов исследуемого масла.

Процесс термического окисления приводит к росту величины диэлектрической проницаемости масла, которая указывает на изменения в молекулярном составе масла, вызванные полимеризацией.

Разработанный метод диагностики позволяет оперативно контролировать процессы окисления и полимеризации электроизоляционной жидкости на растительной основе.

Литература

1. Oommen T.V. Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2002. V. 18, N. 1. pp. 7-11.
2. Semančík P., Cimbala R., Kolcunová I.: Dielectric Analysis of Natural Oils. Acta of Electrotechnica et Informatica. September 2007. V.7. N 3.
3. Ocón R. Experience with the first 230 kV SHELL type autotransformer retrofilled with natural ester on Mexican grid / Proc. of 45 th CIGRE Session, Paris, 2014. Paper A2. 307.
4. K. Bandara, C. Ekanayake, T. Saha, and H. Ma, "Performance of Natural Ester as a Transformer Oil in Moisture-Rich Environments," Energies. 2016. V. N. 4. P. 258,
5. Rafiq, M., Y. Lv, Y. Zhou, K. Ma, W. Wang, C. Li, and Q. Wang. Use of vegetable oils as transformer oils a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. №52. pp.308-324.
6. Hajek J. Considerations for the Design, Manufacture, and Retro- filling of Power Transformers with High Fire Point, Biodegradable Ester Fluids / Proc. of 44 th CIGRE Session, Paris, 2012. Paper A2. 203.
7. Spohner, M. Study of the dielectric properties of vegetable oils and their constituents. in 2016 Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE). 2016.
8. Taslak, E., C. Kocatepe, O. Arıkan, and C. Kumru, Electrical Analysis of Corn Oil as an Alternative to Mineral Oil in Power Transformers. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2015. V.9. N.8. pp. 873-877.
9. IEC 62770 (2013); Fluids for electrotechnical applications - Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment. Edition 1.0. Geneva, IEC Central Office. 2013.P.38
10. Dilip K, Amarjit S, Paramjit ST (2013). Interrelationship between viscosity and electrical properties for edible oils. J. Food Sci. Technol.

11. Patsch, R. Dielectric Diagnostics of Power Transformers and Cables - Return Voltage Measurements, Theory and Practical Results. VDE High Voltage Technology 2018; ETG-Symposium.
12. Muratayev I.A., Muratayeva G.A. Influence of the oxygen aging on dielectric characteristics of oils on the vegetable basis // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. V. 8. pp. 2557-2560.
13. Муратаева Г.А., Муратаев И.А. Математическая модель диэлектрических характеристик масла на растительной основе / Известия Тульского государственного университета. Технические науки: Тула. Изд-во: ТулГУ, 2017. № 9-1. С. 524-531.
14. Ладыгин В.В. Конструирование оксистабильных композиций растительных масел: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015.
15. Аникеева М.А. Исследование стабильности против окисления рапсового масла как диэлектрической жидкости для высоковольтного оборудования // Журнал Инженерной теплофизики. 2016. Т. 25(2). С. 236–239.

Авторы публикации

Муратаева Галия Амировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Муратаев Ибрагим Амирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Oommen TV. Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2002;18(1):7-11.
2. Semančík P., Cimbala R., Kolcunová I.: Dielectric Analysis of Natural Oils. *Acta of Electrotechnica et Informatica*. September 2007.
3. Ocón R. Experience with the first 230 kV SHELL type autotransformer retrofilled with natural ester on Mexican grid / R. Ocón, R. Montes / Proc. of 45 th CIGRE Session, Paris, 2014. Paper A2. 307.
4. Bandara K., Ekanayake C., Saha T, and Ma H., "Performance of Natural Ester as a Transformer Oil in Moisture-Rich Environments". *Energies* 2016;9(4):258.
5. Rafiq, M., Lv Y., Zhou Y., et al. Use of vegetable oils as transformer oils a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;52:308-324.
6. Hajek J. Considerations for the Design, Manufacture, and Retro – filling of Power Transformers with High Fire Point, Biodegradable Ester Fluids. Proc. of 44 th CIGRE Session, Paris, 2012. Paper A2. 203.
7. Spohner, M. Study of the dielectric properties of vegetable oils and their constituents. in *2016 Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE)*. 2016.
8. Taslak, E., Kocatepe C., Arıkan O., and C. Kumru, Electrical Analysis of Corn Oil as an Alternative to Mineral Oil in Power Transformers. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International. Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2015; 9(8):873-877.
9. IEC 62770 (2013): *Fluids for electrotechnical applications - Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment*. Edition 1.0. Geneva, IEC Central Office. 2013. P. 38.
10. Dilip K, Amarjit S, Paramjit ST (2013). *Interrelationship between viscosity and electrical properties for edible oils*. *J. Food Sci. Technol*.
11. Patsch, R. Dielectric Diagnostics of Power Transformers and Cables - Return Voltage Measurements. Theory and Practical Results. VDE . *High Voltage Technology* 2018. ETG-Symposium.
12. Muratayev IA., Muratayeva GA. Influence of the oxygen aging on dielectric characteristics of oils on the vegetable basis. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;8: 2557-2560.
13. Murataeva GA., Murataev I.A. "Matematicheskaya model" dielektricheskikh kharakteristik masla na rastitel'noi osnove. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*: Tula: Izd-vo TulGU, 2017;9-1:524-531.
14. Ladygin VV. *Konstruirovaniye oksistabil'nykh kompozitsiy rastitel'nykh masel*: dis. ... kand. tekhn. nauk. Spb., 2015.
15. Anikeeva MA. Issledovanie stabil'nosti protiv okisleniya rapsovogo masla kak dielektricheskoy zhidkosti dlya vysokovol'tnogo oborudovaniya . *Zhurnal. inzhenernoy teplofiziki*. 2016;25(2):236–239.

Authors of the publication

Galiya A. Murataeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

© Г.А. Муратаева, И.А. Муратаев

Ibragim A. Murataev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

21 мая 2019 г.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ОРЕБРЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В ДВУХТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Н.Ф. Тимербаев¹, А.К. Али², О.А.М. Альмохаммед¹, А.Р. Корякин³

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Инженерный колледж университета Анбар, Республика Ирак

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9209-2085>, omeralhayaly1@yahoo.com

Резюме: В статье проводится математическое моделирование двухтрубного теплообменника, имеющего продольные прямоугольные оребрения размером (2*3*1000) мм, установленные на внешней поверхности внутренней трубки теплообменника. В данной работе математически обосновано преимущество применения такой конструкции при передаче тепла между жидкостями, протекающими через теплообменник, и влияние установки продольных прямоугольных оребрений на эффективность работы теплообменника. Проведенные исследования позволяют проводить расчет оптимальных конструктивных параметров теплообменников.

Диаметр внешней трубы (34,1 мм), а диаметр внутренней трубы (16,05 мм). Толщина стенок труб составляет (1,5 мм), а длина системы (1 м). Горячая вода течет через внутреннюю трубу параллельно с холодной водой, которая проходит через внешнюю трубу. Температура горячей и холодной воды на входе составляет (75 °С и 30 °С) соответственно. Массовый расход внутри центральной трубы составляет (0,1 кг / с), а кольцевая труба несет (0,3 кг / с). Для исследований была использована компьютерная программа ANSYS Workbench 15.0, с целью расчета и визуализации поведения жидкостей внутри теплообменника и получения результатов.

Ключевые слова: эффективность, теплопередача, продольные прямоугольные оребрения, теплообменник, оптимальный дизайн, давление.

Для цитирования: Тимербаев Н.Ф., Али А.К., Альмохаммед О.А.М., Корякин А.Р. Моделирование влияния продольного прямоугольного оребрения на эффективность теплообмена // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С.48-57. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-48-57.

SIMULATION OF THE EFFECTIVENESS OF LONGITUDINAL RECTANGULAR FINS ON THE EFFICIENCY OF THE DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER

N.F. Timerbaev¹, A.K. Ali², O.A. M. Almohammed¹, A.R. Koryakin³

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Engineering College of Anbar University, Republic of Iraq

³Moscow State Technical University N.E. Bauman, Moscow, Russia

Abstract: In this article, a mathematical simulation of a double pipe heat exchanger is carried out, having the longitudinal rectangular fins with the dimension of (2*3*1000) mm, mounted on the outer surface of the inner tube of the heat exchanger. In this paper, the advantage of using of that type of fins and its effect on the effectiveness of the heat exchanger are studied with the help of the computer program. The carried out research allows making the calculation to find the optimum design parameters of heat exchangers.

The outer tube diameter is (34.1mm) while the inner tube diameter is (16.05mm). The tubes wall thickness is (1.5mm) and the model length was (1 m). The hot water is flowing through the inner tube in parallel with the cold water that passing the outer tube. The hot and cold water temperature at the inlet is (75°C & 30°C) respectively. The mass flow rate inside the central pipe

is (0.1 kg/s) while the annular pipe carrying (0.3 kg/s). In the present work, the program ANSYS Workbench 15.0 was used to find out the results of heat transfer as well as the behavior of liquids inside the heat exchangers.

Keywords: efficiency, heat transfer, longitudinal rectangular fins, heat exchanger, optimum design, pressure

For citation: Timerbaev NF, Ali AK, Almohammed OAM, Koryakin AR. Simulation of the effectiveness of longitudinal rectangular fins on the efficiency of the double pipe heat exchanger . *Power engineering: research, equipment, technology*.2019; 21(4):48-57. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-48-57.

Введение

Одним из факторов при конструировании теплообменников является величина теплопередачи, влияющая на размеры теплообменника и позволяющая их минимизировать. Для снижения расхода используемых при производстве теплообменников материалов необходимо повышать эффективность теплообмена. Простейшим устройством, которое передает тепло от горячей жидкости к холодной, является двухтрубный теплообменник. Одно из преимуществ этой системы – низкая стоимость. Однако пространство, которое он занимает, относительно велико по сравнению с другими типами теплообменников [1].

Для повышения эффективности теплообменников используются два метода. Первый метод – активный. Он включает в себя улучшение передачи тепла за счет управления потоком, вибрации и пульсации потока путем периодического изменения давления в системе. Пассивный метод – это метод повышения теплопроводности за счет увеличения поверхности теплообмена, изменения типа используемого материала либо шероховатости поверхности. Предлагаемый в статье пассивный метод улучшения теплопередачи в двухтрубном теплообменнике включает в себя установку продольных прямоугольных оребрений на теплообменных поверхностях для увеличения эффективности теплообмена и уменьшения его размера. В работе изучено влияние расширения площади внутренней трубы в двухтрубном теплообменнике противоточного типа на эффективность работы теплообменника. Для решения этой задачи в источнике [2] предлагается использовать углубления на внутренней трубке для улучшения теплообмена, однако такое решение снижает механическую прочность системы. Анализ экспериментальных и расчетных данных, полученных авторами, показал хорошую сходимость с данными, приведенными в работах [3–5], в которых использовали спиральный перфорированный плавник на трубке для увеличения эффективности теплопередачи.

Математическое моделирование процесса теплопереноса в двухтрубном теплообменнике с оребрением

В каждом теплообменнике имеются две жидкости, протекающие в разных условиях и направлениях. Соотношение между отношением холодной и горячей теплоемкости ограничивает форму профиля температуры в теплообменнике [6], как показано на рис.1.

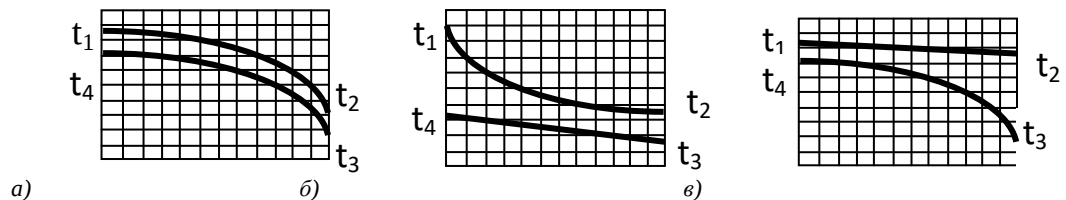


Рис. 1. Профиль температуры

На рис.1 t_1 – температура на входе в горячую жидкость; t_2 – температура выходящей горячей жидкости; t_3 и t_4 – входная и выходная температуры холодной жидкости. Первый случай (а) происходит, когда коэффициент теплоемкости

$$CR_{\text{горячий}} \approx CR_{\text{холодный}} \longrightarrow CR_{\text{минимум}}/CR_{\text{максимум}} \approx 1;$$

второй случай (б) – когда коэффициент теплоемкости

$$CR_{\text{холодный}} > CR_{\text{горячий}} \longrightarrow CR_{\text{минимум}}/CR_{\text{максимум}} \approx 0,25;$$

последний случай (в) – когда коэффициент теплоемкости горячей жидкости больше, чем коэффициент теплоемкости холодной воды:

$$CR_{\text{горячий}} \gg CR_{\text{холодный}} \longrightarrow CR_{\text{минимум}}/CR_{\text{максимум}} \approx 0,$$

где CR – коэффициент теплоемкости [7], который равен

$$CR = \dot{m} C_p, \quad (1)$$

где $\dot{m}$ – массовый расход, кг/с; C_p – удельная теплота жидкости, кДж/кг[°]С.

Эффективность теплообменника определяется как способность передавать тепло от одной жидкости к другой [8], и зависит от коэффициента теплоемкости жидкости при постоянном давлении (CR), который показывает способность жидкости поглощать тепло. Коэффициент (CR) связывает количество тепла с разностью температур жидкости, как показано ниже:

$$Q = CR \Delta t, \quad (2)$$

где Q – количество поглощенного тепла, Вт; Δt – разность температур, [°]С.

В случае идеального теплообменника тепло, отводимое из горячей жидкости, будет поглощаться холодной жидкостью так, что $Q_{\text{горячий}} = Q_{\text{холодный}}$,

$$Q_{\text{горячий}} = CR_{\text{горячий}} (t_{\text{вход}} - t_{\text{выход}})_{\text{горячий}}, \quad (3)$$

$$Q_{\text{холодный}} = CR_{\text{холодный}} (t_{\text{выход}} - t_{\text{вход}})_{\text{холодный}} \quad (4)$$

В идеальном теплообменнике жидкость, которая имеет минимальный коэффициент теплоемкости, должна иметь максимальную разность температур (т. е. разницу между температурой входа холодных и горячих жидкостей), что обеспечит максимальную теплопередачу и называется идеальным количеством теплопередачи (Q_{ideal}) [9]. В связи с отсутствием идеальной системы, эффективность системы определяется по следующему соотношению:

$$\text{Эффективность} = \frac{\text{фактическое тепло, переданное системой}}{\text{тепло, переданное идеальной системой}}$$

Производительность теплообменников зависит от их функционального назначения: для обогрева либо для охлаждения. В случае, если теплообменник используется для нагрева, эффективностью является соотношение между

$$\varepsilon_h = \frac{Q_{\text{фактический}}}{Q_{\text{теоретический}}} = \frac{CR_{\text{холодный}} (t_{\text{выход}} - t_{\text{вход}})_{\text{холодный}}}{CR_{\text{минимум}} (t_{hi} - t_{ci})}, \quad (5)$$

где ε_h – эффективность в случае нагрева теплообменником; $CR_{\text{минимум}}$ – коэффициент теплоемкости жидкости, которая имеет максимальную разность температур

t_{hi} – температура на входе горячей жидкости; t_{ci} – температура на входе холодной жидкости.

В случае, если теплообменник используется для охлаждения, эффективностью является соотношение между

$$\varepsilon_c = \frac{Q_{\text{фактический}}}{Q_{\text{теоретический}}} = \frac{CR_{\text{горячий}} (t_{\text{вход}} - t_{\text{выход}})_{\text{горячий}}}{CR_{\text{минимум}} (t_{hi} - t_{ci})}, \quad (6)$$

где ε_c – эффективность в случае охлаждения теплообменником.

Численный анализ

Численное моделирование системы проводилось для системы, которая включает в себя трубку диаметром 16,05 мм и толщиной стенок 1,5 мм, помещенную во внутреннюю полость трубки большего размера диаметром 34,1 мм. Исследование учитывает изменение площади поверхности внутренней трубки за счет установки продольного прямоугольного оребрения. Размеры оребрений показаны на рис.2. При моделировании проводилось

сравнение системы с оребрением и систем, не имеющих его. На рис.2показаны прототипы моделей, для которых проводилось моделирование.

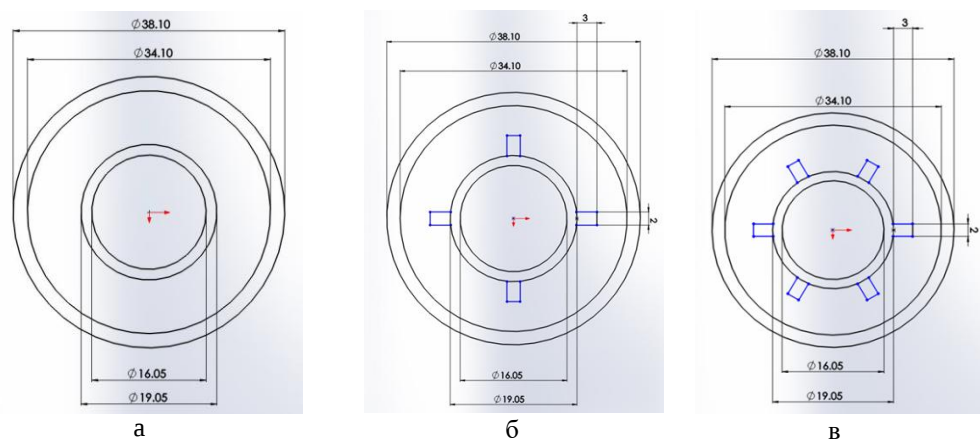


Рис. 2. Размеры поперечного сечения продольных вставок

В теплообменнике протекает жидкость, расчетная скорость которой должна быть не менее 0,5 м/с и не более 1,5 м/с. Для достижения данного диапазона скоростей массовый расход горячей воды внутри внутренней трубки составляет 0,1 кг/с и холодной воды во внешней – 0,3 кг/с.

На рис. 3 показана сетка в среде *ANSYSWorkbench* 15.0, которая использовалась для расчета моделей. Программа может создавать различные количества ячеек, что влияет на скорость вычислений. Достоверность полученных результатов при моделировании напрямую зависит от заданных количества ячеек [11]. В данной работе тест сцепления включает тестирование результатов путем изменения количества ячеек до 1000000. Полученные результаты моделирования показывают, что изменения после 500000 заданных ячеек практически отсутствуют, что приводит к меньшему расчету времени программы.

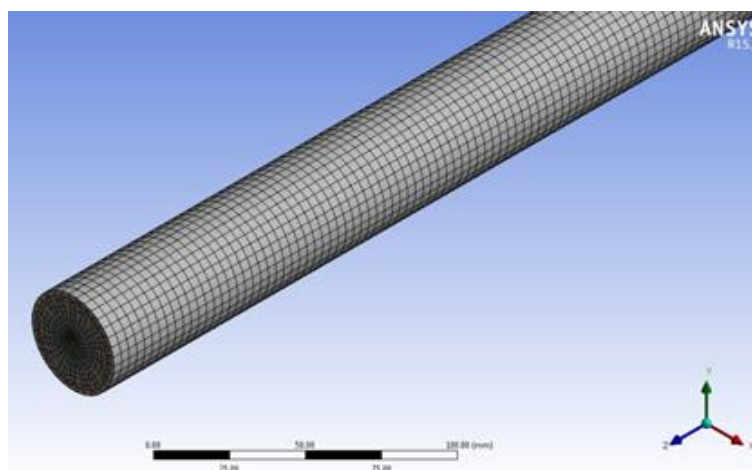


Рис. 3. Дизайн теплообменника

Для достижения оптимального дизайна теплообменника различные модели должны анализироваться программой [12]. Каждая система имеет различное количество продольных прямоугольных оребрений, в то время как температура на входе горячей и холодной жидкостей постоянна.

Численное моделирование

В работе использовалась модель турбулентности К-эпсилон (к-ε). При моделировании характеристик среднего потока в условиях турбулентности в данной модели использовались уравнения вычислительной гидродинамики (CFD) и уравнения переноса (PDEs) с целью улучшения моделирования длины смешения, а также в поиске альтернативы алгебраически заданным масштабам турбулентной длины в потоках средней и высокой сложности. Метод CFD основан на использовании коммерческого программного обеспечения *ANSYS FLUENT* 15.0. Поправочный коэффициент для всех зависимых

переменных указан как 0,0001. Коэффициенты теплопередачи также получены с использованием методов *CFD*.

Результаты

Эффективность двухтрубного теплообменника была достигнута за счет увеличения площади контакта внутренней трубки при помощи продольных прямоугольных оребрений. Размеры оребрений составляли (2*3*100) мм. В данное исследование было охвачено семь моделей. Отличия между моделями заключались в числе оребрений: первая модель не имеет оребрений, а последующие имеют 4, 6, 8, 10, 13 и 16 оребрений соответственно. Поток горячей жидкости проходит через внутреннюю трубу, а холодной – через внешнюю. Массовый расход холодной жидкости составлял 0,3 и горячей – 0,1 кг/с. Для иллюстрации процесса теплопередачи распределение температуры в трех сечениях выполняется для трех моделей, как показано на рис.4. Первое сечение (а) находится у входа холодного потока жидкости, второе (б) – в середине системы и третье (в) – на выходе холодной жидкости из теплообменника.

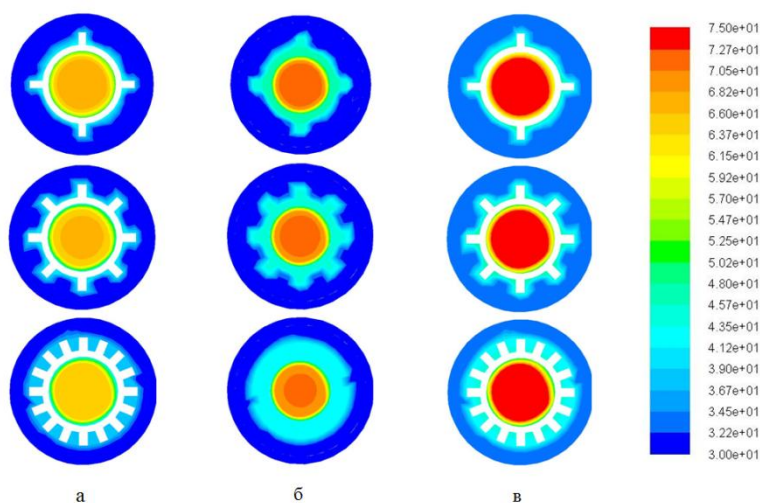


Рис. 4. Распределение температуры

На рис. 5 показано распределение температуры по внутренней трубе. Понятно, что труба с продольным прямоугольным оребрением рассеивает больше тепла, из чего следует, что положение кривой для трубки без оребрения находится выше всех кривых. Существует прямая связь между количеством оребрений и средней температурой воды внутри внутренней трубки [13]. Оребрения в трубке будут увеличивать нагрев для передачи тепла из одной стороны в другую, но в то же время будут сопротивляться потоку жидкости из-за увеличения трения [14]. Это сопротивление приведет к росту мощности, необходимой для прокачки жидкости.

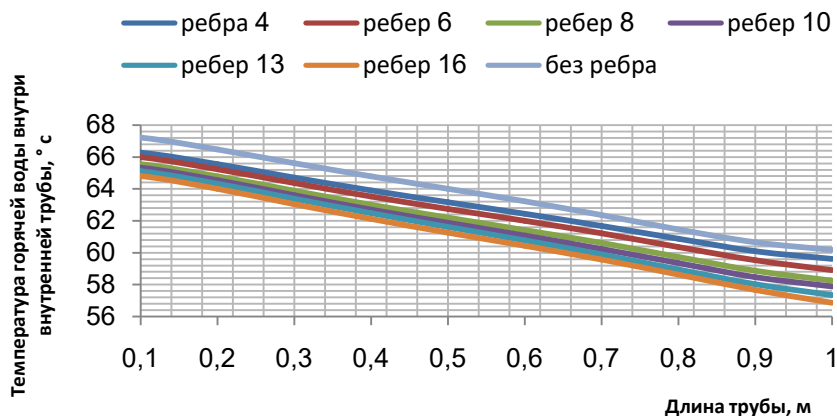


Рис. 5. Температура жидкости внутри центральной трубки вдоль теплообменника

Анализ эффективности работы системы должен учитывать эффективность улучшения теплообменника [15]. Как показано в данном исследовании, эффективность теплообменника в случае нагрева отличается от эффективности в случае охлаждения. В случае нагрева поглощенное холодной жидкостью тепло, в то время как в случае охлаждения это функция тепла, отдаваемого горячей жидкостью [16]. На рис. 6 показана зависимость между эффективностью теплообмена и числом ребер.

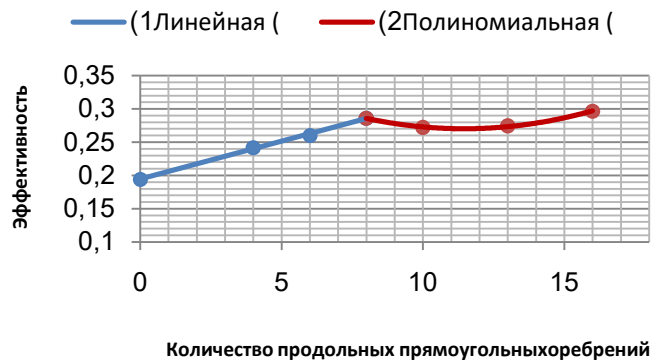


Рис. 6. Зависимость эффективности теплообмена от числа продольных прямоугольных ребер

На рис.6 первая часть графика, начинающаяся с одного и заканчивающаяся четырьмя ребрами, представляет собой линейную функцию. В этой части соотношение между эффективностью и числом ребер является прямой зависимостью. Уравнение, представляющее эту пропорцию, показано ниже:

$$\varepsilon = 113n + 0,195, \quad (7)$$

где ε – эффективность; n – количество ребер.

Вторая часть, начинающаяся с четырех и заканчивающаяся семью ребрами, является полиномиальной. Следующее уравнение иллюстрирует взаимосвязь между переменными в этом разделе:

$$\varepsilon = 0,0013n^2 - 0,0295n + 0,44. \quad (8)$$

Причиной изменения эффективности во втором разделе является скорость жидкости. Увеличение числа ребер привело к уменьшению пространства между трубами теплообменника [17]. Поскольку массовый расход холодной воды постоянный, это означает, что скорость жидкости будет повышаться. Время протекания холодной воды по горячей поверхности зависит от ее скорости, так что быстрота протекания позволит свести к минимуму количество поглощаемого тепла [18].

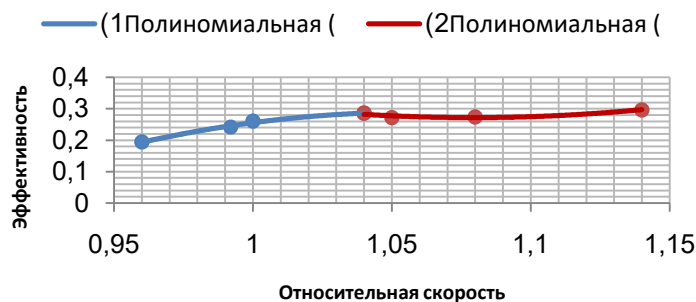


Рис. 7. Эффективность с относительной скоростью движения холодной воды

На рис. 7 относительная скорость является скоростью холодной воды, деленной на скорость горячей воды, так что величина будет являться безразмерной ($U_{c.w.} / U_{h.w.}$).

Кривая (1) является функцией, в которой величина эффективности возрастала. Следующее уравнение показывает это соотношение:

$$\varepsilon = -9,9962n^2 + 21,153n - 10,9 \quad (9)$$

Вторая кривая дает уравнение многочлена, но в этом случае величина эффективности незначительно уменьшается, как показано на рис. 7. Это соотношение представлено выражением

$$\varepsilon = 6,6864n^2 - 14,43n + 8,0576. \quad (10)$$

Дополнительные оребрения приводят к изменению скорости жидкостии увеличивают падение давления через внешнюю трубку. Другим фактором падения давления является следствие трения с проточными стенками [19]. Все вышеизложенное вызывает увеличение падения давления и, следовательно, система нуждается в дополнительной мощности для прокачки жидкости. Следующая кривая и ее уравнение показывают соотношение между количеством оребрений и дополнительной мощностью для прокачки жидкости, необходимой на холодной стороне теплообменника [20](рис. 8).

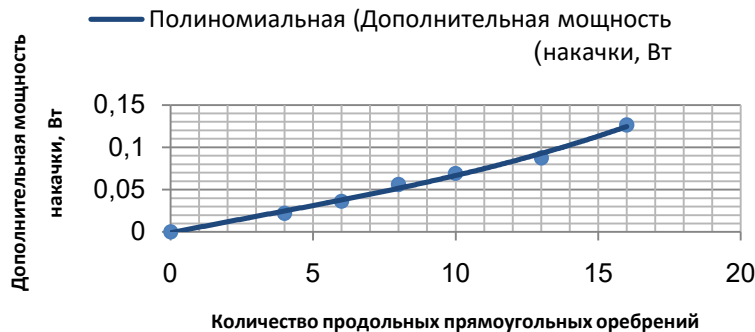


Рис. 8. Кривая расчет дополнительной прокачки

Функция, описывающая кривую на рис. 8:

$$w = 10^{-5} n^3 - 10^{-4} n^2 + 0,0067n - 0,0009 \quad (11)$$

где w – дополнительная мощность накачки, Вт, и рассчитывается по формуле:

$$P_a = P_f - P_w, \quad (12)$$

где P_a – дополнительная мощность накачки, Вт; P_f – мощность накачки в случае оребренной трубки, Вт; P_w – мощность накачки в случае трубки без ребер, Вт.

При анализе экономической эффективности наиболее важным фактором, который играет большую роль, является коэффициент роста производительности системы (рис. 9). Этот коэффициент отражает величину потерь перед приростом. В этой модели произошло увеличение тепловой энергии, нос потерей механической энергии. Следующий рисунок иллюстрирует эту пропорцию.

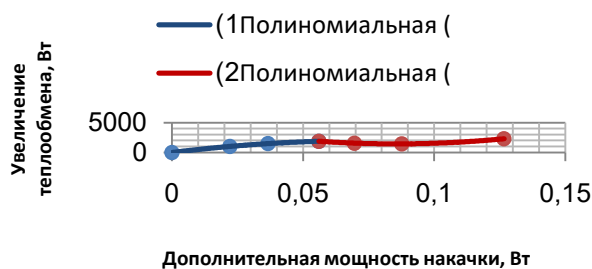


Рис. 9. Коэффициент роста производительности

Уравнение, показывающее первую часть этого соотношения:

$$Q = -377286 w^2 + 54704 w + 0,3894, \quad (13)$$

где Q – увеличение теплообмена, Вт.

Точка экстремума возникает на четвертом шаге, где изменение направления кривой приводит к новому поведению системы, из чего следует другая формула:

$$Q = 514344 w^2 - 87913 w + 5181,8. \quad (14)$$

Увеличение эффективности теплообмена находится через:

$$H_a = H_f - H_w, \quad (15)$$

где H_a – тепловая прибыль, Вт; H_f – тепло, переданное в случае оребренной трубки, Вт; H_w – тепло, переданное от трубки без ребер, Вт.

Дискуссия и выводы

На эффективность теплообменника влияют две переменные: количество продольных прямоугольных оребрений и скорость жидкости. Увеличение количества оребрений увеличивает площадь поверхности контакта, но в то же время уменьшается пространство между трубками теплообменника, что приводит к увеличению скорости жидкости и падению давления.

Увеличение скорости потока жидкости сократит время теплообменного процесса, что повлияет на эффективность системы. Падение давления происходило в результате трения с поверхностью и количеством оребрений в первом случае, а во втором – с увеличением скорости потока жидкости (рис. 7). Увеличение перепада давления требует большей мощности нагнетания жидкости в теплообменник (рис. 8). Исследуемая конструкция оребренного теплообменника имеет сравнительно низкое гидравлическое сопротивление и более эффективный теплообмен, что позволяет снизить затраты при его эксплуатации.

Литература

1. ShivaKumar., K. VasudevKaranth., KrishnaMurthy. Numerical study of heat transfer in a finned double pipe heat exchanger // World Journal of Modelling and Simulation. V. 11. 2015. N1. pp.43-54.
2. Chen. J., Muller-SteinhagenH., DuffyG. Heat transfer enhancement in dimpled tubes // Applied Thermal Engineering. 2001. V.21 .N5. pp. 535–547.
3. LiaoM., XinD. Augmentation of convective heat transfer inside tubes with 3-d internal extended surfaces and twisted tape inserts. Chemical Engg. 2000. V.78. N2. pp. 95–105.
4. EiamsaS., EiamsaP., ThianpongC. Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tape // Experimental thermal & fluid science. 2009. V.34. N1. pp. 53–62.
5. BhuiyaM., ChowdhuryM., et al. Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2013. V.46. pp. 49–57.
6. Chaudhari N.R., Adroja F.N. A Review on Design & Analysis of Double Pipe Heat Exchanger // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2014. V. 3. № 2. pp. 2502–2505.
7. Saud Ghani, Seifelislam Mahmoud Ahmad Gamaledin, Mohammed Mohammed Rashwan, Muataz Ali Atieh. Experimental investigation of double-pipe heat exchangers in air conditioning applications // Energy and Buildings. 2018.
8. OjhaPranod Kailash, ChoudharyBishwajeet N.K., GajeraUmang B., PrajapatSumit B., Karangiya Gopal A. Design and experimental analysis of pipe in pipe heat exchanger // International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER). 2015
9. Emad M.S., El-Said, Mohamed Abdulaziz, Mohamed M. Awad. A numerical investigation on heat transfer enhancement and the flow characteristics in a new type plate heat exchanger using helical flow duct. Cogent Engineering. 2017.
10. Bhanvase B.A., Sayankar S.D., Kapre A.H., et al. Experimental investigation on intensified convective heat transfer coefficient of water based PANI nanofluid in vertical helical coiled heat exchanger // Applied Thermal Engineering. 2018. V.128. pp.134–140.
11. Jian-Fei Zhang, Ya-Ling He, Wen-Quan Tao. 3D numerical simulation on shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and continuous baffles – Pt I: Numerical model and results of whole heat exchanger with middle-overlapped helical baffles // International Journal of Heat and Mass Transfer 52. 2009. pp. 5371–5380.
12. Jiangfeng Guo, Lin Cheng, Mingtian Xu. Optimization design of shell-and-tube heat exchanger by entropy generation minimization and genetic algorithm // Applied Thermal Engineering. 2009. pp. 2954–2960.
13. Guo Z.Y., Liu X.B., Tao W.Q., Shah R.K. Effectiveness–thermal resistance method for heat exchanger design and analysis // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. pp. 2877–2884.

14. Dehankar P. B., Pandhare K. K., Vagare M. J., Nerlekar V. M. A Double Pipe Heat Exchanger – Fabrication and Standardization For Laboratory Scale // *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2015. V.3. N 4. P.27.
15. Dehankar P.B., Patil N.S. Heat Transfer Augmentation – A Review for Helical Tape Insert // *International Journal of Scientific Engineering and Technology*. 2014. V. N 3. 10. pp. 1236-1238.
16. Zohir A.E., Habib M.A., Nemitallah M.A. Heat transfer characteristics in a double-pipe heat exchanger equipped with coiled circular wires. *Experimental Heat Transfer*. 2015. pp. 531–545.
17. Yingshuang Wang, Zhichun Liu, Suyi Huang. Experimental investigation of shell-and-tube heat exchanger with a new type of baffles. *Heat Mass Transfer*. 2011. V.47. pp.833–839.
18. Reza Aghayari., Heydar Maddah., MaliheZarei., et al. Heat Transfer of Nanofluid in a Double Pipe Heat Exchanger, Hindawi Publishing Corporation, International Scholarly Research Notices. 2014. P 7.
19. Rao R.V., Patel V.K. Thermodynamic optimization of cross flow plate-fin heat exchanger using a particle swarm optimization algorithm // *International Journal of Thermal Sciences*. 2010. pp. 1712-1721.
20. Snehal S. Pachegaonkar, Santosh G. Taji, Narayan Sane. Performance Analysis of Double Pipe Heat Exchanger with Annular Twisted Tape Insert // *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* 2014. V. 3. N3. pp. 402-406.

Авторы публикации

Тимербаев Наиль Фаритович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Возобновляемые источники энергии» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). omeralthayaly1@yahoo.com

Асаад Камел Али – магистр инженерного колледжа университета Анбар, Республика Ирак. omeralthayaly1@yahoo.com

Омар Абдулхади Мустафа Альмохаммед – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). omeralthayaly1@yahoo.com

Корякин Аркадий Романович – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана. omeralthayaly1@yahoo.com

Referents

1. Shiva Kumar, K. VasudevKaranth, Krishna Murthy. Numerical study of heat transfer in a finned double pipe heat exchanger. *World Journal of Modelling and Simulation*. 2015 11(1):43-54.
2. ChenJ., Muller-SteinhagenH., DuffyG. Heat transfer enhancement in dimpled tubes. *Applied Thermal Engineering*. 2001;21(5):535–547.
3. LiaoM, XinD. Augmentation of convective heat transfer inside tubes with 3-d internal extended surfaces and twisted tape inserts. *Chemical Engg*. 2000;78(2): 95–105.
4. EiamsaS., EiamsaP., ThianpongC. Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tape. *Experimental thermal & fluid science*. 2009;34(1):53–62.
5. BhuiyaM., ChowdhuryM., et al. Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts. . *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013;46: 49–57.
6. ChaudhariNR, AdrojaFN. A Review on Design & Analysis of Double Pipe Heat Exchanger. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2014;3(2):2502–2505.
7. Saud Ghani, Seifelislam Mahmoud Ahmad Gamaledin, Mohammed MohammedRashwan, Muataz Ali Atieh. Experimental investigation of double-pipe heat exchangers in air conditioning applications. *Energy and Buildings*. 2018.
8. OjhaPranod Kailash, ChoudharyBishwajeet NK., GajeraUmang B., PrajapatSumit B., Karangiya Gopal A. Design and experimental analysis of pipe in pipe heat exchanger. *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2015.
9. Emad MS., El-Said, Mohamed Abdulaziz, Mohamed M. Awad. A numerical investigation on heat transfer enhancement and the flow characteristics in a new type plate heat exchanger using helical flow duct. *Cogent Engineering*. 2017.
10. Bhanvase BA., Sayankar SD., Kapre A., Fule PJ., Sonawane SH. Experimental investigation on intensified convective heat transfer coefficient of water based PANI nanofluid in vertical helical coiled heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2018;128:134–140.
11. Jian-Fei Zhang, Ya-Ling He, Wen-Quan Tao. 3D numerical simulation on shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and continuous baffles . Pt I: Numerical model and results

of whole heat exchanger with middle-overlapped helical baffles. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2009;52:5371–5380.

12. JiangfengGuo, Lin Cheng, Mingtian Xu. Optimization design of shell-and-tube heat exchanger by entropy generation minimization and genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*. 2009. P. 2954–2960.

13. GuoZY., LiuXB., TaoWQ, ShahRK. Effectiveness–thermal resistance method for heat exchanger design and analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. P. 2877–2884.

14. Dehankar PB., PandhareKK., Vagare MJ., Nerlekar VM. A Double Pipe Heat Exchanger – Fabrication and Standardization For Laboratory Scale. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2015;3(4): 27.

15. Dehankar PB., Patil NS. Heat Transfer Augmentation – A Review for Helical Tape Insert. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*. 2014;3(10):1236-1238.

16. Zohir AE., Habib MA., Nemitallah MA. Heat transfer characteristics in a double-pipe heat exchanger equipped with coiled circular wires. *Experimental Heat Transfer*. 2015. pp. 531–545.

17. Yingshuang Wang, Zhichun Liu, Suyi Huang. *Experimental investigation of shell-and-tube heat exchanger with a new type of baffles*. *Heat Mass Transfer*. 2011;47:833–839. doi 10.1007/s00231-010-0590x.

18. Reza Aghayari, Heydar Maddah, MaliheZarei, Mehdi Deghani, and Sahar GhanbariKaskariMahalle. Heat Transfer of Nanofluid in a Double Pipe Heat Exchanger. *Hindawi Publishing Corporation, International Scholarly Research Notices*. 2014. P 7.

19. Rao RV., Patel VK., Thermodynamic optimization of cross flow plate-fin heat exchanger using a particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Thermal Sciences*. 2010. pp.1712-1721.

20. Snehal S. Pachegaonkar, Santosh G. Taji, Narayan Sane. Performance Analysis of Double Pipe Heat Exchanger with Annular Twisted Tape Insert. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* 2014;3(3):402-406.

Authors of the publication

Nail F. Timerbaev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
omeralthayaly1@yahoo.com.

Asaad Kamel Ali – Engineering College of Anbar University, Republic of Iraq.
omeralthayaly1@yahoo.com.

Omar Abdulhadi Mustafa Almohamed – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
omeralthayaly1@yahoo.com.

Arkady R. Koryakin – student Moscow State Technical Universityth. N.E. Bauman.
omeralthayaly1@yahoo.com.

Поступила в редакцию

12 марта 2019 г.



ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОТЛА ПОСРЕДСТВОМ ПИНЧ-МЕТОДА

Е.А. Юшкова, В.А. Лебедев

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

atenoks@mail.ru

Резюме: Данная статья поможет рассмотреть проблему термодинамической оптимизации теплоэнергетического оборудования. Решение данного вопроса позволяет повысить энергоэффективность тепловых систем путем снижения затрат энергетических ресурсов. Существует большое количество методов для исследования энергетических установок, в работе совмещены два метода: эксергетический и пинч метод. Эксергетический анализ тепловых систем показывает количественные и качественные характеристики эффективности. Пинч-метод позволяет решать конкретные проектные задачи по оптимизации параметров теплоэнергетических объектов. В основе пинч-анализа лежит энтальпия, которая не учитывает потенциал тепла. В работе предлагается проводить пинч-анализ источников тепловой энергии при помощи эксергии, которая может более качественно оценить потенциал тепловых потоков и показывает зависимость энергии тепловых потоков от температуры окружающей среды. В статье приводится эксергетический анализ такого объекта, как прямоточный котел ПП-2650-255 ГМ с помощью пинч-метода. Результаты работы показывают, что для повышения энергоэффективности котла можно изменить площади поверхностей нагрева экономайзера и воздухоподогревателя. Таким образом, эксергетический пинч-анализ является эффективным методом для повышения энергоэффективности теплоэнергетического оборудования.

Ключевые слова: энергоэффективность; эксергия; эксергетический анализ; тепловой баланс; эксергетический баланс; пинч-анализ; методы термодинамического анализа; прямоточный котел; эксергетический пинч-анализ; экономайзер; воздухоподогреватель.

Для цитирования: Юшкова Е.А., Лебедев В.А. Эксергетический анализ котла посредством пинч-метода // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019.Т.21.№4. С. 58-65.doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-58-65.

EXERGY ANALYSIS OF THE BOILER USING THE PINCH METHOD

E.A. Yushkova, V.A. Lebedev

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: This article will help to consider the problem of thermodynamic optimization of heat power equipment. Solving this issue will allow to increase the energy efficiency of thermal systems by reducing the cost of energy resources. There is a large number of methods for studying power plants, and we will combine two of them: the exergy method and the pinch method. Exergy analysis of thermal systems shows quantitative and qualitative characteristics of efficiency. The pinch method allows us to solve specific design problems to optimize the parameters of heat power facilities. The pinch analysis is based on enthalpy, which does not take into account the heat potential. We propose to conduct a pinch analysis of thermal energy sources using exergy, which can better assess the potential of heat fluxes and show the dependence of the energy of heat fluxes on the ambient temperature. The article provides an exergy analysis of a direct-flow boiler PP-2650-255 GM using the pinch method. The results of our work show that in order to increase the energy efficiency of the boiler, it is possible to change the area of the heating surfaces of the economizer and air heater. Thus, exergy pinch analysis is an effective method for increasing the energy efficiency of heat power equipment.

Keywords: energy efficiency; exergy; exergy analysis; heat balance; exergy balance; pinch analysis; methods of thermodynamic analysis; direct-flow boiler; exergy pinch analysis; economizer; air heater.

For citation: Yushkova EA, Lebedev VA. Exergy analysis of the boiler using the pinch method *Power engineering: research, equipment, technology*.2019; 21(4):58-65. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-58-65.

Введение и литературный обзор

На данный момент для исследования энергетических установок на энергоэффективность чаще всего используют энтальпийный метод. Энтальпийный метод позволяет приблизительно проанализировать энергетические характеристики и энергетические возможности термодинамической системы.

Энтальпийный метод не позволяет определить качественную сторону энергии, то есть вопросы о превращениях одних форм энергии в другие. Таким образом энтальпийный метод не дает полный ответ на вопрос о практической возможности получения, преобразования и использования энергий [1].

Также в современной энергетике для определения энергоэффективности системы используют понятие КПД, который прямо пропорционален полезному эффекту и обратно пропорционален затрачиваемой энергии. Получается, что для холодильных установок КПД может достигать значений более 100 %. Для тепловых насосов КПД может быть 300-500 %. Но КПД не может превышать 100 %, следовательно, в данном методе есть неучтенные моменты.

Мартынов А.В. в своей статье предлагает такой КПД называть целевым коэффициентом. Целевые коэффициенты не показывают реальную эффективность установок и систем, так как целевые коэффициенты включают в себя различные виды энергии, такие как работа, электроэнергия, тепло. Нельзя с энергией разных видов, производить алгебраические, арифметические и другие действия [2].

Для определения эффективности теплотехнических систем более целесообразно применять методы, основанные на совместном использовании первого и второго законов термодинамики [3].

Метод, включающий в себя оба принципа термодинамики, называют термодинамическим. Он основан на том, что совершенство любого реального процесса должно оцениваться по степени его отклонения от обратимого процесса. Имеется две разновидности этого метода: эксергетический метод (метод потоков эксергии), энтропийный метод (метод вычитания эксергетических потерь).

Эксергия дает возможность оценить качественную сторону тепловой энергии, т. е. она представляет собой особую универсальную меру энергетических ресурсов.

Одинаковое количество теплоты, например, $Q = 839$ кДж, может быть получено при температуре теплоносителя 50 С и 90 С. Однако ясно, что для практического использования теплоноситель, имеющий более высокую температуру, обладает большей ценностью, чем низкотемпературный теплоноситель. Данный факт подтверждает эксергетический анализ [4]. Посмотрим эксергетический баланс котла на рис. 1.

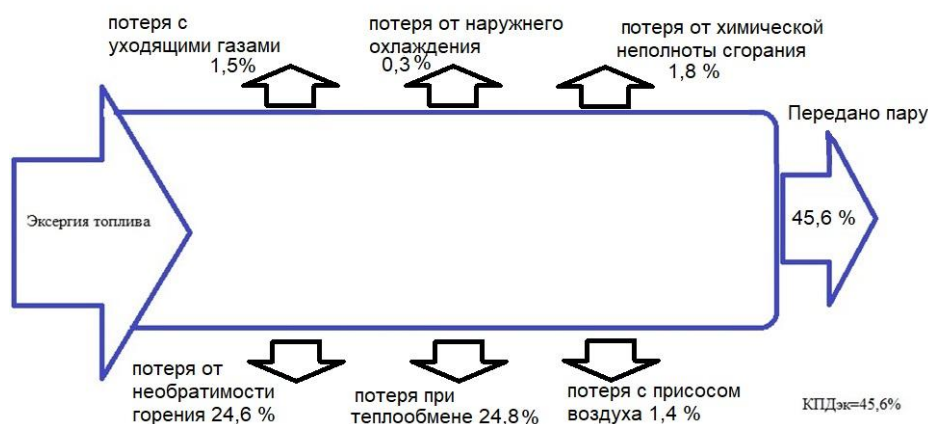


Рис. 1. Эксергетический баланс котла

Сумма коэффициентов от необратимого горения, теплообмена и присосов воздуха составляет 50,8 %, что в тепловом балансе котла даже не учитывается.

При тепловом балансе котельного агрегата КПД брутто =94 %, что намного больше, чем показывает эксергетический КПД: 45,6 %. Многие современные ученые подтверждают данный факт [5].

В области эксергетического анализа проведен литературный обзор, следующих авторов: Д.П. Гохштейна, В.М. Бродянского, Я. Шаргута, Р. Петелы, Б.С. Сажина, А.П. Булекова, А.И. Андрущенко, Я.М. Рубинштейна, М.И. Щепетильникова, и др. В данных работах изложены теоретические основы эксергетического анализа. В последнее время многие исследователи сосредоточили свое внимание на эксергетическом анализе тепловых электростанций для оптимизации качества энергии.

Также Богданов А.Б. в статье [6] рассказывает о важности определения качества энергии: «Впервые в теплоэнергетике и российской экономике энергетике применение понятий ЭКСЕРГИЯ и АНЕРГИЯ позволяет производить классификацию качества рыночного товара: тепловой и электрической энергии, в зависимости от потребности в первичном топливе -энергоемкости. Показано, что энергоемкость для производства равного количества энергии отличается в 2-7 и более раз, в зависимости от вида и технологии ее производства энергии».

Промышленный сектор (нефтехимические, химические и металлургические процессы, системы отопления и охлаждения и т. Д.) Является наиболее сложным для определения общих значений эффективности и эффективности из-за большого разнообразия использования энергии. Методы эксергии используются во многих отраслях промышленности, поскольку они предоставляют мощные инструменты для анализа, оценки, проектирования, улучшения и оптимизации систем и процессов [7].

Эксергетический метод стал известным в 1851–1854 гг. и получил широкое применение в различных отраслях промышленности, где он успешно применяется в 21 веке [8].

Эксергия определяется следующей формулой:

$$Ex = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (1)$$

где T_0 – температура окружающей среды, в которую происходит сток теплоты, T – температура, при которой происходит передача теплоты Q [9].

Цацаронис и Мунг-Хо [10] были первыми, кто разработал концепции предотвратимого и неизбежного разрушения эксергии, которые были использованы для определения потенциала улучшения термодинамических характеристик и экономической эффективности системы.

Основы в области интеграции тепловых процессов и пинч-анализа изложены в работах Б. Линнхофа, Й. Клемеша, Л.Л. Тобажнянского, Р. Смита, Л.М. Ульева, П.А., Капустенко и др.

Пинч-анализ – методология минимизации энергопотребления процесса посредством термодинамического расчета обоснованных объемов энергопотребления и приближения к ним с помощью оптимизации теплопередачи между процессами [11]. Пинч-метод позволяет достичь минимальных затрат экономических ресурсов за счет уменьшения использования внешних энергоносителей как подводящих энергию, так и отводящих [12].

В основе пинч-анализа лежит энтальпия, которая не учитывает потенциал тепла. Мы предлагаем проводить анализ источников тепловой энергии при помощи эксергии, которая может более качественно оценить потенциал тепловых потоков и показывает зависимость энергии тепловых потоков от температуры окружающей среды.

В основе пинч-анализа лежит энтальпия, которая не учитывает потенциал тепла. В работе предлагается проводить пинч-анализ источников тепловой энергии при помощи эксергии, которая может более качественно оценить потенциал тепловых потоков и показывает зависимость энергии тепловых потоков от температуры окружающей среды.

Материалы и методы

В теории Пинч-анализа все тепловые потоки можно разделить на две группы. Первая группа – потоки, которые требуют охлаждения. Они называются «Горячие потоки». Так как энтальпия горячих потоков уменьшается при охлаждении потока, данные потоки будут обозначаться вектором, направленным справа налево в координатах температура–энтальпия. Вторая группа – потоки, которые требуют нагревания перед дальнейшей работой с ними. Их называют «Холодные потоки». В координатах температура–энтальпия «Холодные потоки» будут показаны вектором, который направлен слева направо [13].

Изменение энтальпии потока при различных начальных и конечных температурах выражается по формуле

$$dH = C_p \cdot M \cdot dT, \quad (2)$$

где C_p – удельная теплоемкость вещества потока при постоянном давлении, Дж/(кг·К); M – массовый расход вещества потока, кг/с; T – температура, К; H – теплосодержание потока, Вт [14].

Прямоточный котел ПП-2650-255 ГМ применяется на мощных тепловых электростанциях России (Сургутская ГРЭС-2 и т.д.), поэтому возьмем данный котел в качестве примера для эксергетического анализа посредством пинч-метода.

Для анализа возьмем только часть котла: экономайзер и воздухоподогреватель. Схема участка котла изображена на рис.2.

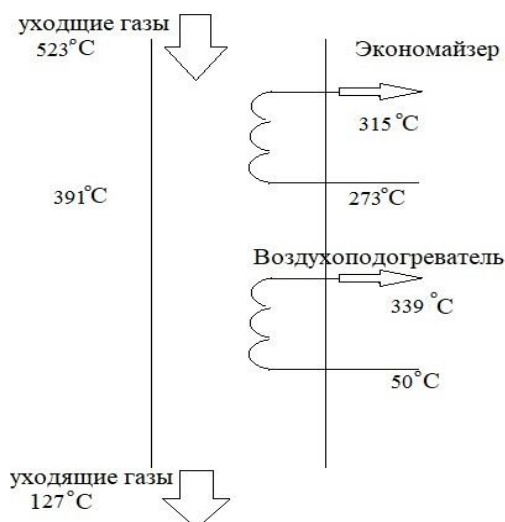


Рис. 2. Схема участка прямоточного котла ПП-2650-255 ГМ

В расчетах и графиках вместо теплосодержания будем использовать эксергию потока. В нашем случае уходящие газы, отдающие тепло экономайзеру, будем называть «Горячий поток 1», уходящие газы, греющие воздухоподогреватель, – «Горячий поток 2». Во вторую группу потоков войдут те потоки, которые необходимо нагреть – «Холодные потоки», в данном котельном агрегате вода экономайзера – это «Холодный поток 1», а нагреваемый воздух воздухоподогревателя – это «Холодный поток 2». Данные для расчета тепловых потоков взяты из пособия [15].

Таблица

Параметры котла

	Температура начальная, °С	Температура конечная, °С	Удельная теплоемкость, кДж/кг К	Массовый расход, кг/с	Эксергия, МВт
Холодный поток 1	273	315	4,8	686	-71
Холодный поток 2	50	339	1,02	350	-40
Горячий поток 1	523	391	1,16	700	66
Горячий поток 2	391	127	1,16	700	102

При постоянной температуре потока определить эксергию потоков не сложно и эксергетическая функция теплоты определяется по формуле (1).

Но при изменении температуры технологического потока эксергетическая функция теплоты установки выглядит иначе.

Так, например, нагреваемая вода («Холодный поток 1») в экономайзере имеет начальную температуру и конечную.

Полагая, что

$$Q = c \cdot m \cdot (T_1 - T_2),$$

где c – удельная теплоёмкость потока, Дж/(кг·град); m – массовый расход потока, кг/с;

T_1 – начальная температура потока, °C; T_2 – конечная температура потока, °C.

Тогда уравнение (1) в дифференциальном виде будет выглядеть следующим образом:

$$d(Ex) = c \cdot m \cdot \tau \cdot dT = c \cdot m \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dT \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3) в интервале температур от T_1 до T_2 , получается зависимость эксергетической функции для количества теплоты, которое необходимо для нагрева теплового потока:

$$\begin{aligned} Ex &= \int_{T_2}^{T_1} c \cdot m \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dT = c \cdot m \cdot \left[T - T_0 \cdot \ln(T)\right] \Big|_{T_2}^{T_1} \\ &= c \cdot m \cdot \left[T_1 - T_0 \cdot \ln(T_1) - T_2 + T_0 \cdot \ln(T_2)\right] \\ &= c \cdot m \cdot \left[T_1 - T_2 - T_0 \cdot (\ln(T_1) - \ln(T_2))\right] \\ &= c \cdot m \cdot \left[T_1 - T_2 - T_0 \cdot \ln \frac{T_1}{T_2}\right]. \end{aligned}$$

Рассчитаем эксергию для «Холодного потока 1» по формуле (4). Температура окружающей среды, взятая для расчетов, равна 0 °C:

$$Ex = 4,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \times ^\circ\text{C}} \cdot 686 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot B \left[546\text{K} - 588\text{K} - 273\text{K} \cdot \ln \frac{546\text{K}}{588\text{K}} \right] = -71\text{МВт}.$$

Данные потоки изобразим в системе координат «эксергия–температура» на рис.3 и рис.4.

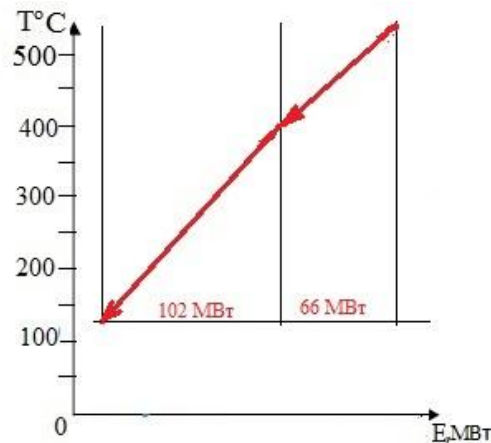


Рис.3. «Горячие потоки» в системе координат «эксергия – температура»

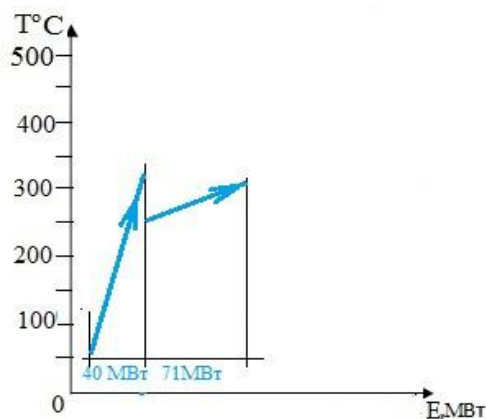


Рис.4. «Холодные потоки» в системе координат «эксергия – температура»

Преобразуем графики методом пинч-анализа(рис.5).

Проекции кривых на ось эксергии перекрывают друг друга. Это значит, что энергия, отводимая от «горячих потоков», может быть использована для нагрева «холодных потоков» посредством рекуперации.

В теории пинч-анализа говорится, что у каждой из составных кривых существует участок, проекция которого на ось энтальпии не перекрывается проекцией второй кривой, то есть холодная составная нуждается во внешнем источнике тепла, а горячая требует дополнительного внешнего охлаждения.

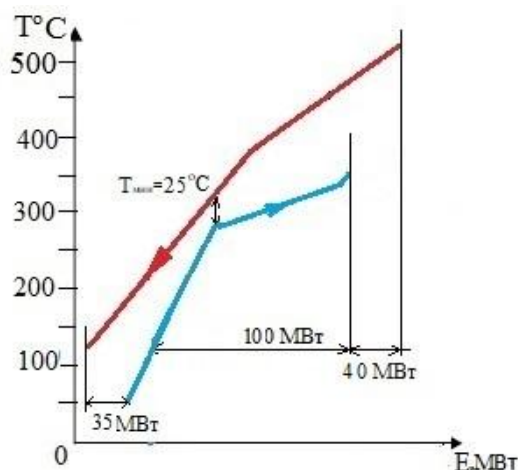


Рис.5. Преобразованные тепловые потоки в системе координат «эксергия – температура»

Результаты и обсуждение

Анализируя график (Рис.5.), можно сделать выводы:

- 1.«Горячие потоки» перекрывают полностью «холодные потоки», следовательно, холодная составная кривая НЕ нуждается во внешнем источнике тепла (это видно из верхней части графиков). А эксергия еще остается 40 МВт.
- 2.В нижней части графика видно, что нужно отвести 35 МВт.
- 3.Предоставляется возможность для передачи эксергии между процессами (рекуперация), 100 МВт эксергии.

А также по теории пинч-анализа необходимо сближать составные кривые (по горизонтали) до минимальной температуры– точки - пинча. Это необходимо для того, чтобы система имела наибольшую рекуперацию энергии, используя при этом минимум внешних источников. В данном анализе пинч-точка – $T_{\min} = 25^{\circ}\text{C}$.

Заключение или выводы

Эксергетический анализ посредством пинч-метода показал, что у котла есть неиспользуемая эксергия, равная 75 МВт (40 МВт в верхней части и 35 МВт в нижней части графика). Для повышения эффективности, исходя из расчетов, мы можем увеличить площадь поверхности нагрева экономайзера, так как график показал 40 МВт неиспользуемой эксергии. Аналогично, можно увеличить поверхность нагрева воздухоподогревателя (35 МВт эксергии), но уже в меньшей степени.

Можно сказать, что необходимо увеличить поверхность нагрева экономайзера больше, чем воздухоподогревателя, так как уходящие газы, греющие воду в экономайзере, имеют больший потенциал тепла 523–391 °С, чем уходящие газы, греющие воздух в воздухоподогревателе, 391–127 °С.

Данный эксергетический метод ориентирован на окружающую среду, т.е. учитывает условия эксплуатации технологического оборудования (температуру окружающей среды) [15].

Литература

1. Агапов Д.А. Структурная и параметрическая оптимизация систем промышленного теплотехнического и технологического оборудования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04. СПб, 2017. 312 с.
2. Мартынов А.В. Определение энергетической эффективности аппаратов, установок и систем // Новости теплоснабжения. 2010. №10(122). С. 17–19.

3. Полканов А.С., Лавров С.В. Эксергия и ее основные виды // Студенческая научная конференция за 2016 год. Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2016. С. 321.
4. Юшкова Е.А., Лебедев В.А. Потоки энергии и эксергии // Молодой ученый. 2017. №12 (146). С. 17–19.
5. Лебедев В.А. Эксергетический метод оценки энергоэффективности оборудования систем энергообеспечения предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.435–443.
6. Богданов А. Б. Экономика энергетики ТЭЦ с применением эксергии и анергии. Доступно по: // URL: <http://exergy.narod.ru/Nigre2015-11.PDF>. Ссылка активна на: 31.03.2019.
7. Rosen M. A., Dincer I. Exergoeconomic analysis of power plants on various fuels. // Applied Thermal Engineering. 2003. V.23. pp.643–658.
8. Медведева Г.А., Лабуткин А.Г., Ибрагимова Л.У., Мухаметзянова А.К. Эксергия – путь энергосбережения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», 2016. Т.8. С.1-11. Доступно по: <http://naukovedenie.ru/PDF/59TVN416.pdf>.
9. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия: Пер. польск.; Под ред. В.М. Бродянского. М.: Энергия, 1968. 280 с.
10. Tsatsaronis G., Moung-Ho P. On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems // Energy Conversion Management. 2002. V.43. pp.1259–1270.
11. Пинч-анализ. Государственная информационная система в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Доступно по: URL: <https://gisee.ru/articles/sub-methods/778/>. Ссылка активна на: 30.01.2019.
12. Marcelo Castier. Pinch analysis revisited: New rules for utility targeting, Applied Thermal Engineering. 2019. V.27. N. 8–9. pp.1653–1656.
13. Kemp Ian C. Pinch analysis and process integration. A user guide on process integration for the efficient use of energy 2nd Ed. Elsevier Ltd, 2007. 415 p.
14. Смит Р., Клемеш Й., Тобажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. Харьков: НТУ «ХПИ», 2000.
15. Yushkova E. A. Exergetic method of analysis of thermal power systems. International University of Resources. Scientific Reports on Resource Issues 2017. V.1. pp. 457–461.

Авторы публикации

Юшкова Екатерина Александровна – аспирант Санкт-Петербургского горного университета. atenoks@mail.ru

Лебедев Владимир Александрович – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплотехника и теплоэнергетика» Санкт-Петербургского горного университета. atenoks@mail.ru

References

1. Agapov DA. Structural and parametric optimization of systems of industrial heat engineering and technological equipment: dis. ... Dr. Sciences: 05.14.04. St. Petersburg, 2017. 312 p.
2. Martynov AV. Determination of energy efficiency of devices, installations and systems. *News of heat supply*. 2010;10 (122): 17–19.
3. Polkanov AS., Lavrov SV. Exergy and its main types. *Student Scientific Conference for 2016. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technology*, 2016. P. 321.
4. Yushkova EA, Lebedev VA. Streams of energy and exergy. *Young scientist*. 2017;12 (146):17–19.
5. Lebedev VA. Exergetic method for assessing the energy efficiency of equipment of energy supply systems of enterprises of the mineral resource complex. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016;21:435–443. doi 10.18454 / PMI.2016.3.435.
6. Bogdanov AB. *Economics of power plants with the use of exergy and anergy*. Available at: // URL: <http://exergy.narod.ru/Nigre2015-11.PDF>. Accessed to: 03/31/2019.
7. Rosen MA., Dincer I. Exergoeconomic analysis of power plants on various fuels. *Applied Thermal Engineering*. 2003;23:643–658.

8. Medvedeva GA., LabutkinAG.,Ibragimova LU., Muhametzyanova AK. Eksergiya – put 'energoberezheniya Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE». 2016;8:1-11. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/59TVN416.pdf> .
9. Shargut I., Petela R. *Exergy*. E.d. V.M. Brodyansk.M: Energy, 1968. (In Polish).
10. Tsatsaronis G., Moungh-Ho P. On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems. *Energy Conversion Management*.2002;43:1259-1270.
11. Pinch analysis. *State information system in the field of energy conservation and energy efficiency*. Available at:URL: <https://gisee.ru/articles/sub-methods/778/> Accessed 01/30/2019.
12. Marcelo Castier. Pinch analysis revisited: New rules for utility targeting. *Applied Thermal Engineering*.2019;2:8–9:1653-1656.
13. Kemp Ian C. Pinch analysis and process integration .*A user guide on process integration for the efficient use of energy* (2nd Ed.). Elsevier Ltd, 2007.415 p.
14. Smith R., Klemesh J., Tovazhnyansky LL., Kapustenko PA., Uliev LM. *Basics of the integration of thermal processes*. Kharkov: NTU “KhPI”, 2000.
15. Yushkova EA. Exergetic method of analysis of thermal power systems. *International University of Resources. Scientific Reports on Resource Issues*. 2017;1:457-461.

Authors of the publication

Ekaterina A. Yushkova – Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia. atenoks@mail.ru.

Vladimir A. Lebedev – Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia. atenoks@mail.ru.

Поступила в редакцию

27 мая 2019 г.

**СТРУКТУРНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ
ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОЙ
ЧАСТОТНОЙ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В.Р. Иванова, И.Ю. Иванов, В.В. Новокрещенов

**Казанский Государственный Энергетический университет,
Казань, Россия**

vr-10@mail.ru, igorivanov85@list.ru, vitnov@inbox.ru

Резюме: При системных авариях, связанных со снижением частоты с целью предотвращения полного погашения энергорайона и ускорения ликвидации аварии применяется частотная делительная автоматика (ЧДА). Существующие технические решения по реализации ЧДА не всегда обеспечивают баланс вырабатываемой и потребляемой мощности при действии ЧДА, поскольку не учитывается текущая схемно-режимная ситуация. Целью настоящей работы является разработка эффективных алгоритмов функционирования адаптивной ЧДА, осуществляющей выделение энергоблоков электростанции на сбалансированную нагрузку изолированного энергорайона с учётом текущей схемно-режимной ситуации. Для решения поставленной цели используется метод структурного и параметрического синтеза алгоритмов противоаварийного управления, который заключается в создании составной алгоритмической модели адаптивной ЧДА. Результатом данной работы является разработанная алгоритмическая модель адаптивной ЧДА электростанции, состоящая из алгоритмов ввода и обработки входных аналоговых сигналов ЧДА, алгоритмов ввода и обработки входных дискретных сигналов ЧДА, алгоритмов формирования пусковых органов ЧДА, алгоритмов выделения электростанции на сбалансированную нагрузку энергорайона. Предложенный алгоритм функционирования адаптивной ЧДА является универсальным и позволяет автоматически выделять энергоблоки электростанции на сбалансированную нагрузку изолированного энергорайона, вне зависимости от вида аварии и её причины, конфигурации электрической сети и величин выработки и потребления электроэнергии, а также текущей схемно-режимной ситуации.

Ключевые слова: системная авария, алгоритм, частотная делительная автоматика, электростанция, противоаварийное управление.

Для цитирования: Иванова В.Р., Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В. Структурный и параметрический синтез алгоритмов противоаварийного управления для реализации адаптивной частотной делительной автоматики электротехнических систем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 4. С. 66-76. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-66-76.

**STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF ANTI-AVERAGE CONTROL
ALGORITHMS FOR REALIZING ADAPTIVE FREQUENCY OPERATING
AUTOMATICS ELECTROTECHNICAL SYSTEMS**

VR. Ivanova, IY. Ivanov, VV. Novokreshchenov

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

vr-10@mail.ru, igorivanov85@list.ru, vitnov@inbox.ru

Abstract: In the event of accidents in power systems associated with a reduction in frequency in order to prevent the complete repayment of the energy district and accelerate the elimination of the accident, frequency division automatics (FDA) are used. Existing technical solutions for the implementation of the FDA do not always provide a balance of the generated and consumed power under the action of the FDA, since the current circuit-mode situation is not taken into

account. The aim of this work is to develop effective algorithms for the functioning of adaptive FDA, which allocates power units of a power plant to a balanced load of an isolated energy district, taking into account the current circuit-mode situation. To achieve this goal, we use the method of structural and parametric synthesis of emergency control algorithms, which consists in creating a composite algorithmic model of adaptive FDA. The result of this work is the developed algorithmic model of an adaptive FDA of a power plant, consisting of input and processing algorithms for input analog signals of a FDA, algorithms for input and processing of input discrete signals of a FDA, algorithms for generating start-up organs of a FDA, algorithms for allocating a power plant to a balanced load of a power district. The proposed algorithm for the functioning of adaptive FDA is universal and allows you to automatically allocate power units of a power plant to a balanced load of an isolated energy district, regardless of the type of accident and its cause, the configuration of the electrical network and the values of electricity generation and consumption, as well as the current circuit-mode situation.

Keywords: system crash, algorithm, frequency dividing automatics, power station, emergency control.

For citation: Ivanova VR, Ivanov IY, Novokreshchenov VV. Structural and parametric synthesis of anti-average control algorithms for realizing adaptive frequency operating automaticselectrotechnical systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):66-76. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-66-76.

Введение

Одной из основных функций автоматической системы управления аварийными режимами в единой энергетической системе России является предотвращение недопустимого, по условиям устойчивой работы генерирующего оборудования и энергопринимающих установок потребителей электрической энергии, снижения частоты и полного погашения энергосистемы или ее части при возникновении дефицита активной мощности, в том числе при аварийном выделении энергосистемы или ее части на изолированную работу [1, 2].

Литературный обзор

Обзор масштабных системных аварий, имевших место в крупных энергосистемах мира, показал, что основной причиной погашения отделившихся районов является потеря генерирующих мощностей из-за каскадного развития аварий внутри данных энергорайонов [3–6].

Наиболее характерный сценарий развития системной аварии с выделением энергорайонов следующий. Потеря одной из линий связи энергорайона в результате устойчивого повреждения приводит к набросу мощности на оставшиеся в работе линии связи. В результате этого на данных линиях возникает термическая перегрузка или асинхронный режим, ликвидируемые автоматикой ограничения перегрузки оборудования (АОПО) или автоматикой ликвидации асинхронного режима (АЛАР), после чего происходит выделение района на изолированную работу (с дефицитом или избытком мощности) [7–8].

Выделение энергорайона с несбалансированной нагрузкой и генерацией тепловых электростанций (ТЭС) приводит к каскадному развитию аварии и полному обесточиванию района с потерей собственных нужд электростанции.

Эффективным мероприятием сохранения работоспособности собственных нужд электростанции при системных авариях, связанных со снижением частоты при выделении крупных энергорайонов или общесистемном снижении частоты, является частотная делительная автоматика (ЧДА), предназначенная для отделения электростанции или ее части на сбалансированную нагрузку. Применение этой автоматики имеет целью предотвращение полного погашения района и ускорение ликвидации аварии.

Однако в настоящее время на большей части тепловых электростанций в энергосистемах России реализуются мероприятия по выделению отдельных энергоблоков на собственные нужды и нагрузку района, имеющие ряд существенных недостатков:

1. Не учитывается режим работы электростанции, соотношение между генерирующей и потребляемой мощностями района, что существенно влияет на динамику развития аварии.
2. Не учитывается состояние схемы сети энергорайона и схема электростанции (ремонт, плановые отключения и т.д.).

3. Не учитывается эффективность действия автоматической частотной разгрузки (АЧР) до срабатывания пусковых органов ЧДА.

Для устранения перечисленных недостатков актуальной задачей является разработка решений по выделению ТЭС на нагрузку энергорайона или собственные нужды с целью обеспечения баланса вырабатываемой и потребляемой мощности при действии ЧДА с учётом действия АЧР и текущей схемно-режимной ситуации [9–11].

Материалы и методы

Целью настоящей работы является разработка эффективных алгоритмов функционирования адаптивной ЧДА, осуществляющей выделение генераторов (энергоблоков) ТЭС на сбалансированную нагрузку изолированного энергорайона с учётом текущей схемно-режимной ситуации. Для решения поставленной цели необходимо решить задачи структурного и параметрического синтеза алгоритмов противоаварийного управления [12–15]. Они заключаются в процессе создания составной алгоритмической модели адаптивной ЧДА, то есть в определении набора элементов, из которых состоит составная модель, способов их соединения и взаимодействия, а также в определении параметров электрического режима, используемых для разработки эффективных алгоритмов функционирования адаптивной ЧДА [16–18].

Для примера рассмотрим тепловую электрическую станцию со схемой распределительного устройства (РУ) 110 кВ, показанную на рис. 1.

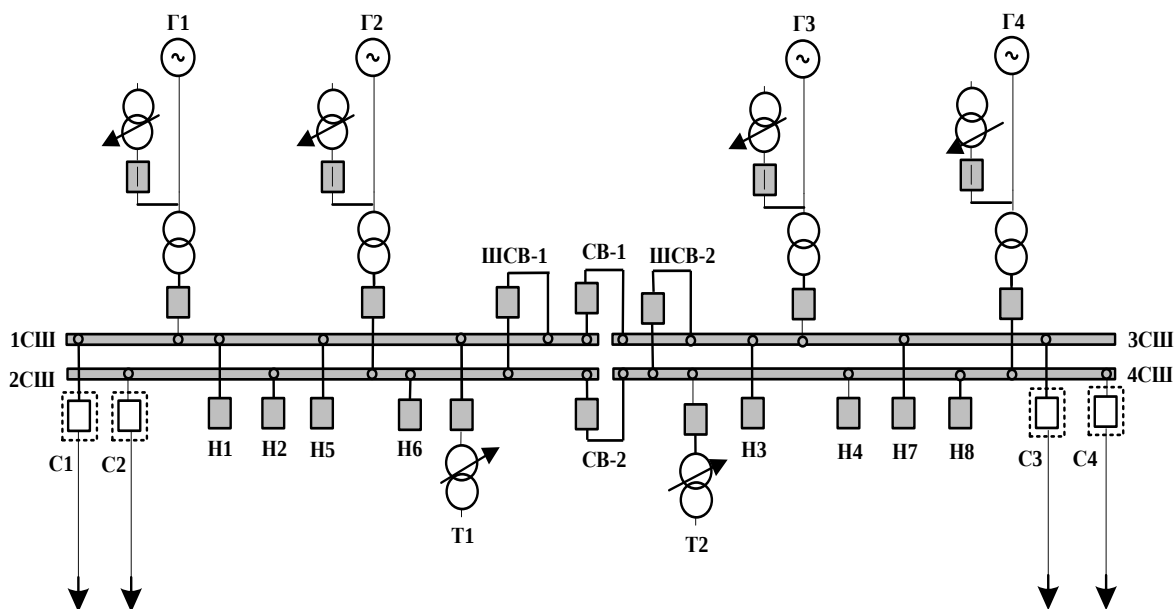


Рис. 1. Схема распределительного устройства 110 кВ тепловой электростанции

К схеме РУ 110 кВ тепловой электростанции подключены энергоблоки с генераторами Г1-Г4, внешние источники электроэнергии – системные линии С1-С4, потребители электрической энергии – тупиковые линии (нагрузка) Н1-Н8, трансформаторы собственных нужд электростанции Т1, Т2. Режим работы систем шин 1СШ, 2СШ, 3СШ, 4СШ – параллельный, так как включены шиносоединительные и секционные выключатели ШСВ-1, ШСВ-2, СВ-1, СВ-2.

Для обеспечения эффективной работы адаптивной ЧДА должно выполняться следующее условие:

$$P_{\min} < P_n < P_{\text{уст}}, \quad (1)$$

где $P_{\min}$ – минимальная величина регулировочного диапазона генерирующего оборудования, выделяемого на изолированную нагрузку, МВт; P_n – величина нагрузки выделяемого энергорайона после работы АЧР, МВт; $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность генерирующего оборудования, выделяемого на изолированную нагрузку, МВт.

Также как и в традиционной, в адаптивной ЧДА целесообразно применять пусковые органы, фиксирующие в аварийном режиме отклонения параметров электрического режима – частоты и/или напряжения на шинах ТЭС.

При достижении уставок срабатывания по частоте и/или по напряжению

адаптивная ЧДА реализует управляющие воздействия на отключение системных ЛЭП для отделения станции на изолированную от единой энергетической системы работу. На рис. 1 показаны штриховой рамкой выключатели системных ЛЭП С1-С4, отключаемые действием ЧДА при срабатывании пусковых органов.

В общем случае при выделении генерирующего оборудования на изолированную работу баланс генерируемой и потребляемой активной мощности на шинах ТЭС может быть любым: от минимальной генерации во время максимальной нагрузки до максимума генерации при минимальной нагрузке [19]. Поэтому, после выделения ТЭС на изолированную работу, необходимо осуществить балансировку по активной мощности на шинах распределительного устройства ТЭС. Для этого необходимо рассчитать величину активной мощности на шинах распределительного устройства ТЭС в доаварийном режиме (в нормальном режиме в пределах допустимых отклонений частоты $50 \pm 0,2$ Гц):

$$\Sigma P = P_{C1} + P_{C2} + P_{C3} + P_{C4} - P_{AЧР}, \quad (2)$$

где $P_{C1}, P_{C2}, P_{C3}, P_{C4}$ – активные мощности системных линий; $P_{AЧР}$ – суммарная активная мощность потребителей электрической энергии, отключаемой действием АЧР на рассматриваемой ТЭС (для примера можно рассмотреть суммарную мощность тупиковых линий Н5-Н8).

Для расчёта величины активной мощности на шинах распределительного устройства ТЭС принимаем следующие полярности измеряемых активных мощностей ЛЭП: при перетоке активной мощности P от линии в сторону шин ТЭС – отрицательное значение P ; при перетоке активной мощности P от шин ТЭС в сторону линии – положительное значение P .

При дефиците активной мощности в доаварийном режиме ($\Sigma P < 0$) ЧДА реализует адаптивные управляющие воздействия путём отключения нагрузки на заданную величину небаланса согласно определённому приоритету и перечню отключаемых потребителей по следующему алгоритму:

$$\begin{aligned} \Sigma P < 0 & - \text{отключение 1 очереди нагрузки (1ОН);} \\ \Sigma P + P_{1ОН} < 0 & - \text{отключение 2 очереди нагрузки (2ОН);} \\ \Sigma P + P_{1ОН} + P_{2ОН} < 0 & - \text{отключение 3 очереди нагрузки (3ОН);} \\ \Sigma P + P_{1ОН} + P_{2ОН} + P_{3ОН} < 0 & - \text{отключение 4 очереди нагрузки (4ОН),} \end{aligned}$$

где $P_{1ОН}, P_{2ОН}, P_{3ОН}, P_{4ОН}$ – активная мощность нагрузки, соответствующая очереди отключения одной из тупиковых линий, не отключаемых действием АЧР на рассматриваемой ТЭС (для примера можно рассмотреть тупиковые линии Н1–Н4).

Если выделение генерирующего оборудования ТЭС происходит с незначительным избытком активной мощности ($\Sigma P > 0$, частота в послеаварийном режиме не более 51 Гц), баланс активной мощности может достигаться действием быстродействующих электрогидравлических систем регулирования (ЭГСР) турбин электростанции на разгрузку.

Однако при значительном избытке активной мощности ($\Sigma P \gg 0$) потребуется реализация адаптивных управляющих воздействий от ЧДА путём отключения генераторов. При этом реализация данных управляющих воздействий от ЧДА возможна одним из следующих способов:

1) отключение избыточной генерации от ЧДА в соответствии с фиксированным набором управляющих воздействий для всех возможных комбинаций состава работающего генерирующего оборудования электростанции;

2) реализация управляющих воздействий на заданную величину небаланса согласно определённому приоритету и перечню отключаемых генераторов по следующему алгоритму:

$$\begin{aligned} \Sigma P - P_{1ОГ} > 0 & - \text{отключение 1 очереди генераторов 1ОГ;} \\ \Sigma P - P_{1ОГ} - P_{2ОГ} > 0 & - \text{отключение 2 очереди генераторов 2ОГ;} \\ \Sigma P - P_{1ОГ} - P_{2ОГ} - P_{3ОГ} > 0 & - \text{отключение 3 очереди генераторов 3ОГ;} \\ \Sigma P - P_{1ОГ} - P_{2ОГ} - P_{3ОГ} - P_{4ОГ} > 0 & - \text{отключение 4 очереди генераторов 4ОГ;} \end{aligned}$$

где $P_{1ОГ}, P_{2ОГ}, P_{3ОГ}, P_{4ОГ}$ – активная мощность генераторов, соответствующая очереди отключения одного из энергоблоков ТЭС.

Таким образом, в соответствии с рассматриваемыми выше алгоритмами функционирования автоматики, структурную схему адаптивной ЧДА можно представить следующим образом (рис. 2). В качестве допущения предполагается, что выделение

генерирующего оборудования ТЭС происходит с дефицитом активной мощности или с незначительным избытком, при котором действие ЧДА на отключение энергоблоков ТЭС не производится.

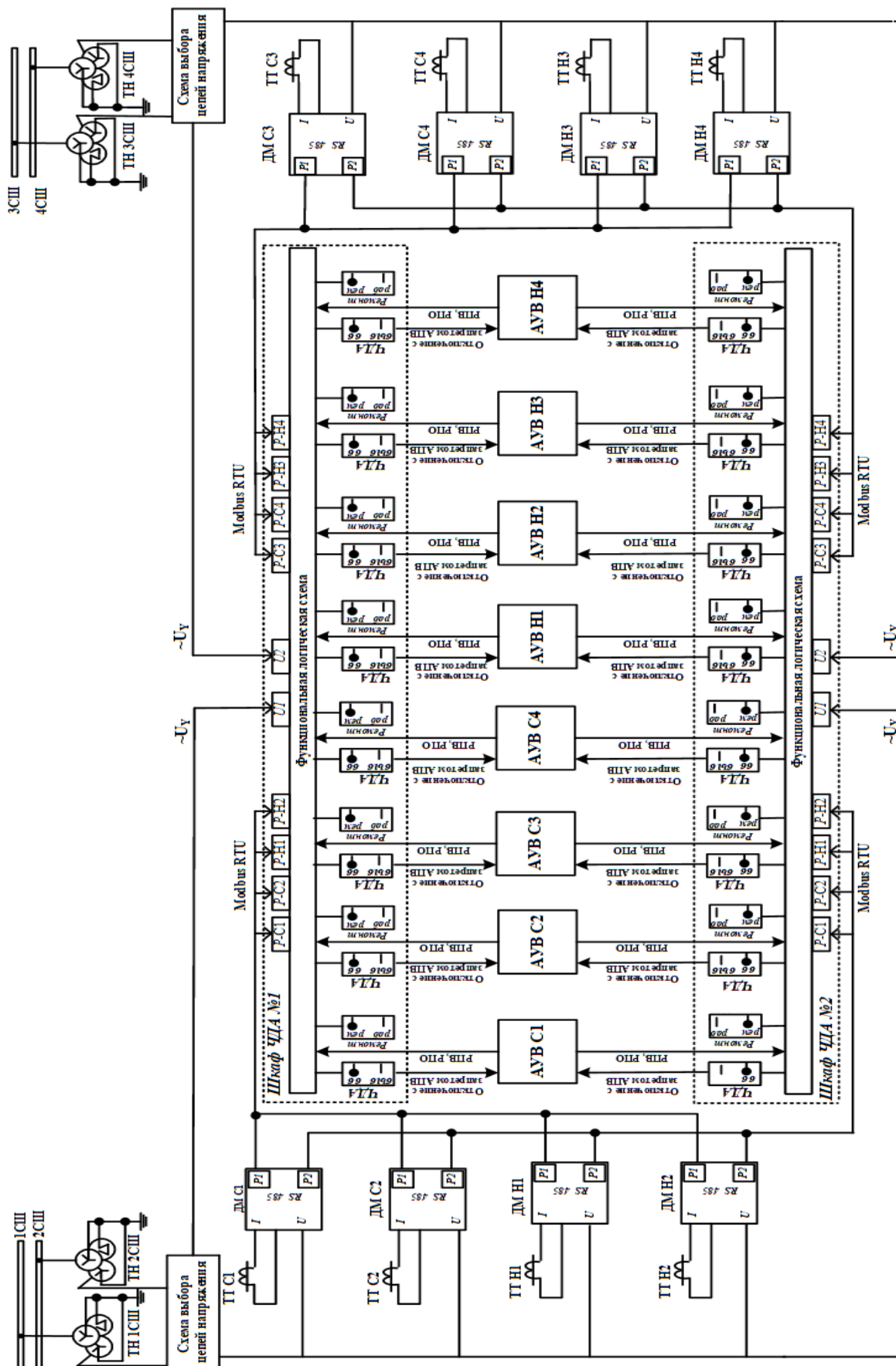


Рис. 2. Структурная схема адаптивной ЧДА тепловой электростанции

На структурной схеме адаптивной ЧДА показаны:

- измерительные трансформаторы напряжения ТН 1СШ, ТН 2СШ, ТН 3СШ, ТН 4СШ, подключённые к соответствующим системам шин: 1СШ, 2СШ, 3СШ, 4СШ электростанции;
- измерительные трансформаторы тока системных линий ТТ С1, ТТ С2, ТТ С3, ТТ С4 и тупиковых линий ТТ Н1, ТТ Н2, ТТ Н3, ТТ Н4;
- датчики мощности ДМ С1, ДМ С2, ДМ С3, ДМ С4, ДМ Н1, ДМ Н2, ДМ Н3, ДМ Н4, осуществляющие измерение режимных параметров перетоков активной мощности системных и тупиковых линий;
- шкафы автоматики управления выключателем (АУВ) системных и тупиковых линий АУВ С1, АУВ С2, АУВ С3, АУВ С4, АУВ Н1, АУВ Н2, АУВ Н3, АУВ Н4;
- шкафы противоаварийной автоматики ЧДА №1 и ЧДА №2.

Результаты

Составная алгоритмическая модель адаптивной ЧДА включает в себя:

1. Алгоритмы ввода и обработки входных аналоговых сигналов ЧДА.

Входными аналоговыми сигналами адаптивной ЧДА являются:

- сигналы от измерительных трансформаторов напряжения для измерения частоты и/или напряжения на шинах высокого напряжения ТЭС;
- сигналы от измерительных преобразователей (датчиков) активной мощности системных и тупиковых ЛЭП, отходящих от шин ТЭС для реализации управляющих воздействий от ЧДА при отрицательном балансе активной мощности на шинах распределительного устройства ТЭС в доаварийном режиме;
- сигналы от измерительных преобразователей (датчиков) активной мощности генераторов (энергоблоков), подключённых к шинам ТЭС для реализации управляющих воздействий от ЧДА при положительном балансе активной мощности на шинах распределительного устройства ТЭС в доаварийном режиме (при необходимости).

Для исключения излишних срабатываний ЧДА, обусловленных снижением частоты при выбеге электродвигателей, целесообразно выполнить блокировку ЧДА, основанную на контроле частоты в двух точках. Устройства ЧДА с блокировкой такого типа действуют только при одновременном срабатывании двух реле частоты, питающихся от разных трансформаторов напряжения, что характерно для общесистемного снижения частоты. Уставка по времени блокировки должна быть больше максимального времени выбега электродвигателей.

Режимные параметры перетоков активной мощности системных и тупиковых ЛЭП могут поступать на вход адаптивной ЧДА как непосредственно от датчиков мощности, установленных на электростанции, так и через устройства телеизмерения от внешних систем измерения.

Информация о текущем значении мощности каждого режимного параметра может поступать по двум независимым каналам (основному и резервному) для целей резервирования всего тракта измерения. Выбор «рабочего» канала должен осуществляться с учетом неисправности каналов. Неисправность каналов должна фиксироваться по любому из следующих условий:

- выход измерения за допустимый диапазон изменения;
- наличие дискретного сигнала о неисправности канала;
- наличие неисправности, зафиксированной средствами внутреннего контроля аппаратных средств устройства автоматики.

При отсутствии неисправностей по основному и резервному каналам или при неисправности резервного в качестве «рабочего» канала принимается основной канал.

При неисправности основного канала в качестве «рабочего» канала принимается резервный канал. При неисправности основного и резервного каналов расчетное значение режимного параметра принимается равным нулю с включением внешней сигнализации «Нет измерения». При отсутствии неисправностей по основному и резервному каналам и расхождении измерений по каналам на величину, большую допустимой, в качестве «рабочего» канала принимается основной канал с включением внешней сигнализации «Расхождение измерений».

Если информация о текущем значении мощности режимного параметра поступает только по одному (основному) каналу, то при его неисправности расчетное значение режимного параметра принимается равным нулю с включением внешней сигнализации «Нет измерения».

Ввод аналоговых сигналов для целей ЧДА должен выполняться циклически с

периодом не более 0,02 с – для сигналов от измерительных ТН, и не более 5 с – для сигналов от датчиков мощности.

2. Алгоритмы ввода и обработки входных дискретных сигналов ЧДА.

Для адаптивной ЧДА должна быть предусмотрена возможность ввода следующих типов дискретных сигналов:

- сигналы фиксации включённого и отключённого положения выключателей системных и тупиковых ЛЭП, отходящих от шин ТЭС (используются для блокировки измерения активной мощности при проведении регламентных и ремонтно-восстановительных работ; сигналы фиксации отключённого положения выключателей системных ЛЭП могут также использоваться как критерий успешного отделения ТЭС на изолированную от единой энергетической системы работу);

- сигналы фиксации включённого и отключённого положения выключателей генераторов (энергоблоков), подключённых к шинам ТЭС в случае реализации алгоритма отключения избыточной генерации от ЧДА в соответствии с фиксированным набором управляющих воздействий для всех возможных комбинаций состава работающего генерирующего оборудования электростанции или в зависимости от измеренной величины небаланса активной мощности согласно определённому приоритету и перечню отключаемых генераторов;

- сигналы фиксации неисправности устройств измерения режимных параметров, используемые для блокировки обработки соответствующих режимных параметров при неисправности или выводе из работы трансформаторов напряжения (ТН), датчиков или устройств телеизмерения (ТИ) с возможностью перехода на резервный канал измерения, если таковой предусмотрен. Источниками сигналов данного типа могут являться устройства телемеханики и оперативные переключатели и накладки;

- сигналы задания очередности отключения присоединений (нагрузки) и генераторов (энергоблоков). Сигналы поступают от оперативных переключателей в двоичной форме по два сигнала на присоединение, позволяя задать одну из четырех очередей отключения (0, 1, 2, 3), одна из которых может быть использована как блокировка отключения присоединения (как правило, 0).

- другие сигналы, позволяющие оперативному персоналу вносить изменения в алгоритм функционирования автоматики. Например, сигнал «Блокировка действия ЧДА» при определённых схемно-режимных условиях.

Источниками сигналов фиксации включённого и отключённого положения выключателей являются реле положения «включено» (РПВ) и реле положения «отключено» (РПО) автоматики управления выключателем (АУВ) соответствующего присоединения или специальные устройства фиксации отключения линий (ФОЛ), фиксации отключения блоков (ФОБ), а также оперативные переключатели и накладки, расположенные в шкафу ЧДА, фиксирующие длительное состояние элемента сети.

Ввод указанных типов дискретных сигналов для целей ЧДА должен выполняться циклически с периодом не более 5 с.

Для оценки исправности трактов ввода сигналов должны быть предусмотрены специальные средства программно-аппаратного контроля, позволяющие локализовать неисправность до элемента замены.

3. Алгоритмы формирования пусковых органов (ПО) адаптивной ЧДА.

Основой формирования ПО адаптивной ЧДА являются модули измерителя частоты и напряжения (ИЧН). Каждый модуль ИЧН осуществляет измерение частоты, напряжения, скорости изменения частоты и напряжения в одной контрольной точке и по запросу центрального процессора передает данные с использованием внутренней локальной сети. Периодичность опроса модулей ИЧН должна быть не более 0,02 с.

Условиями срабатывания ПО адаптивной ЧДА могут являться:

- 1) снижение частоты ниже заданной уставки (У1);
- 2) снижение напряжения ниже заданной уставки (У2);
- 3) скорость снижения частоты превышает заданную величину (У3);
- 4) скорость снижения напряжения превышает заданную величину (У4).

Применение условия У1 является основным при дефиците активной мощности в энергосистеме, при этом ЧДА, как правило, имеет две ступени с разными уставками по частоте и разными выдержками времени:

- 1 ступень (быстродействующая): 46,0–47,0 Гц / 0,3–0,5 с.
- 2 ступень (резервная): 47,0–47,5 Гц / 30–40 с.

Применение условия У2 целесообразно при высокой плотности нагрузки в рассматриваемом энергорайоне, например, в мегаполисах, где значительные снижения

напряжения более вероятны, чем снижение частоты. Это связано, прежде всего, с перегрузками ЛЭП и трансформаторного оборудования и их отключением устройствами АОПО, что приводит к невозможности выдачи мощности от генерирующих источников в энергосистему и значительному утяжелению процесса аварии [8].

Условия У3 и У4 являются дополнительными и могут использоваться в отдельных дефицитных энергорайонах, в которых при отделении от энергосистемы скорость снижения частоты и/или напряжения существенно выше, чем при общесистемном дефиците мощности.

При этом для исключения неправильной работы ЧДА должна предусматриваться возможность задания условия срабатывания ПО адаптивной ЧДА при одновременном выполнении условий в двух контролируемых точках схемы [20, 21].

4. Алгоритмы выделения ТЭС на сбалансированную нагрузку энергорайона или собственные нужды.

Алгоритм выделения генерирующего оборудования на нагрузку «своих» собственных нужд является наиболее простым и эффективным при наличии технической возможности по обеспечению баланса активной мощности с учётом выражения (1). Однако реализация данного алгоритма может быть невозможна в случае превышения минимальной величины регулировочного диапазона генерирующего оборудования, выделяемого на изолированную нагрузку, величины нагрузки собственных нужд.

В этом случае должен быть применён алгоритм выделения генерирующего оборудования ТЭС на изолированную нагрузку энергорайона с учетом схемно-режимных параметров и возможностью реализации управляющих воздействий на отключение нагрузки (при дефиците мощности) и отключение генераторов (при избытке мощности). Кроме того, алгоритм выделения ТЭС на сбалансированную нагрузку энергорайона является наиболее эффективным на ТЭС с поперечными связями по паре [22], так как оказывает наименьшее влияние на теплотехнические процессы после срабатывания ЧДА.

Основными требованиями при выборе отключаемых присоединений от адаптивной ЧДА, учитывающей схемно-режимные, являются:

- учёт текущего состояния присоединения (включён/отключён);
- учёт заданной очередности отключения, включая запрет отключения, задаваемой оперативными переключателями и накладками;
- минимизация избыточности балансирующего воздействия при отключении присоединений.

При авариях в энергосистемах, связанных с дефицитом активной мощности, с целью предотвращения повреждения оборудования, нарушения технологических процессов в электроустановках потребителей с непрерывным циклом работы [10], может быть также рассмотрен вопрос расширения границ выделяемого энергорайона. В этом случае при действии ЧДА часть системных линий, отходящих от РУ ТЭС, остаётся в работе, а выделяемое генерирующее оборудование ТЭС сохраняет электроснабжение потребителей, подключённых к шинам соседних узловых подстанций.

Однако, по нашему мнению, это может быть не всегда обоснованно по следующим причинам:

- 1) снижение надёжности ЧДА из-за увеличения количества применяемых технических устройств (датчики измерения активной мощности, устройства фиксации включенного и отключенного состояния оборудования, устройства телемеханики, устройства передачи аварийных сигналов и команд и т.д.);
- 2) невозможность выделения генерирующего оборудования ТЭС на нагрузку соседних узловых подстанций при первоочередном действии АЧР на отключение данной нагрузки;
- 3) значительное увеличение стоимости создания системы противоаварийного управления.

Выводы

1. Применение структурного и параметрического синтеза алгоритмов противоаварийного управления позволило создать составную алгоритмическую модель адаптивной ЧДА тепловой электростанции, состоящую из алгоритмов ввода и обработки входных аналоговых сигналов ЧДА, алгоритмов ввода и обработки входных дискретных сигналов ЧДА, алгоритмов формирования пусковых органов ЧДА, алгоритмов выделения ТЭС на сбалансированную нагрузку энергорайона или собственные нужды.

2. Предложенный алгоритм функционирования адаптивной ЧДА является универсальным и позволяет автоматически выделять генераторы (энергоблоки) ТЭС на сбалансированную нагрузку изолированного энергорайона, вне зависимости от вида

аварии и её причины, конфигурации электрической сети и величин выработки и потребления электроэнергии, а также текущей схемно-режимной ситуации.

3. Реализация предложенного алгоритма функционирования адаптивной ЧДА возможна с использованием микропроцессорной элементной базы устройств автоматики, которые, благодаря своему быстродействию, способны решать задачи сохранения электроснабжения наиболее ответственных потребителей при крупных системных авариях.

Литература

1. Абдушукуров Т.М. Разработка комплексного алгоритма частотной делительной автоматики // Материалы 9 Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2018». 2018. С. 7–10.
2. Ахмедова О.О. Разработка алгоритма функционирования управляющей системы быстродействующей релейной защиты воздушной линии электропередачи // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 3. С. 7–13.
3. Баракин К.А. Технические решения по реализации автоматики выделения на сбалансированный энергорайон ТЭЦ с поперечными связями по пару // Электрические станции. 2013. № 5. С. 30–39.
4. Гусева Е.В. Модернизация частотной делительной автоматики Симферопольской ТЭЦ // Энергетические установки и технологии. 2017. Т.3, № 1. С. 35–39.
5. Даминов А.И. Адаптивные алгоритмы работы частотной делительной автоматики // Материалы докладов 12 Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», 2017. С. 234–237.
6. Ефремова И.Ю. Адаптивная настройка пускового органа противоаварийной автоматики для транзитов с промежуточными отборами мощности // Электричество. 2017. № 2. С. 13–17.
7. Иванова В.Р. Разработка критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации активно-адаптивных электроэнергетических систем // Материалы международной научной конференции «Высокие технологии и инновации в науке». СПб, 2018. С. 112–116.
8. Иванова В.Р. Разработка учебного стенда для эффективной и безопасной эксплуатации резервного электроснабжения на промышленных предприятиях // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2018. № 9-10. С.165–169.
9. Иванова В.Р. Исследование функциональных возможностей систем релейной защиты и автоматики для применения их в интеллектуальных энергосистемах с активно-адаптивной сетью // Материалы 4 Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». 2018. Т.1. С. 138–140.
10. Иванова В.Р. Анализ основных элементов интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью // Материалы 1 Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники». 2019. С. 12–17.
11. Иванова В.Р. Обзор современных устройств релейной защиты, автоматики и измерительных преобразователей, используемых при модернизации электротехнических комплексов и систем // Материалы докладов 14 международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». Казань: КГЭУ, 2019.
12. Илюшин П.В. Особенности реализации многопараметрической делительной автоматики в энергорайонах с объектами распределенной генерации // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 6. С. 12–24.
13. Ионов А.А. Особенности выделения тепловых электрических станций с поперечными связями действием частотной делительной автоматики // Материалы 8 Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2017». 2017. С. 108–111.
14. Карпов А.С. Автоматизированная система контроля эффективности действия частотной делительной автоматики // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 4(135). С. 94–99.
15. Костин В.Н. Повышение эффективности действия частотной делительной автоматики системы электроснабжения мегаполиса // Технические науки – от теории к практике. 2012. № 10. С. 78–84.
16. Осак А.Б. Анализ режимной надежности при планировании развития энергосистем для обоснования затрат на реконструкцию РЗА // Оперативное управление в электроэнергетике. Подготовка персонала и поддержание его квалификации. 2017. № 5. С. 49–59.

17. Патрахина А.Ю. Моделирование работы ТЭС в условиях аварийного отключения от энергосистемы // Сборник научных трудов «Научные проекты образовательных школ ПРДСО - 2016». 2016. С. 62–65.
18. Попов С.С. Модернизация противоаварийной автоматики для интеллектуального выделения электростанций на сбалансированную нагрузку // Материалы докладов 12 Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции. 2017. С. 269–273.
19. Русаков Е.А. Модернизация противоаварийной автоматики для интеллектуального выделения электростанций на сбалансированную нагрузку // Материалы 9 Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2018». 2018. С. 105–106.
20. Саргсян К.Б. Реализация автоматики переводов ПГУ энергоблока № 5 Разданской ТЭС в паросиловой и газотурбинный режимы // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 39–44.
21. Федотов А.И. Критерии и алгоритмы автоматики выделения ТЭЦ на нагрузку энергорайона при системных авариях на базе современных микропроцессорных комплексов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2008. № 7-8. С. 71–78.
22. Фирстов П.Е. Анализ устройств автоматики ограничения снижения частоты в энергорайоне Тверской ТЭЦ-4 // Материалы 8 Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2017». 2017. С. 43–46.

Авторы публикации

Иванова Вилия Равильевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Иванов Игорь Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Новокрепцов Виталий Викторович – аспирант, ассистент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Abdushukurov TM. Development of a complex algorithm for frequency dividing automation . *Proceedings of the 9th International Scientific and Technical Conference "Power industry through the eyes of young people - 2018"*. 2018. pp. 7-10.
2. Akhmedova OO. Development of an algorithm for the operation of a control system for high-speed relay protection of an overhead transmission line. *Modern high technologies*. 201; 3:7-13.
3. Barakin KA. Technical solutions for the implementation of the automation of the allocation of a balanced power district CHP with a cross-connection a couple. *Electric stations*. 2013;5:30-39.
4. Guseva EV. Modernization of frequency dividing automatics of Simferopol TPP. *Power plants and technologies*. 2017;3(1):35-39.
5. Daminov AI. Adaptive algorithms of frequency dividing automation . *Proceedings of the reports of the 12th All-Russian Open Youth Scientific-Practical Conference "Dispatching and Control in the Electric Power Industry"*. 2017. pp. 234-237.
6. Efremova IYu. Adaptive setting of the emergency control automatic start-up body for transit with intermediate power selections. *Electricity*. 2017;2 :13-17.
7. Ivanova VR. Development of criteria for assessing decisions made in the design, creation and operation of active-adaptive electric power systems. *Proceedings of the international scientific conference "High Technologies and Innovations in Science"*. St. Petersburg. 2018. pp. 112-116.
8. Ivanova VR. Development of a training facility for the efficient and safe operation of backup power supply at industrial enterprises. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2018;9-10:165 -169.
9. Ivanova VR. Study of the functionality of relay protection and automation systems for their application in intelligent power systems with an active-adaptive network. *Proceedings of the 4th National Scientific and Practical Conference "Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services"* 2018;1:138 - 140.

10. Ivanova VR. Analysis of the basic elements of an intelligent electric power system with an active-adaptive network. *Proceedings of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects for the Development of the Electric Power Industry and Electrical Engineering"*, 2019. pp. 12 - 17.
11. Ivanova VR. Overview of modern devices of relay protection, automation and measuring transducers used in the modernization of electrical systems and systems. *Proceedings of the 14th International Youth Scientific Conference «Tinchurin Readings»*. Kazan: KGEU, 2019.
12. Ilyushin PV. Features of the implementation of multiparameter dividing automatics in energy districts with distributed generation facilities. *Relay Protection and Automation*. 2018; 6:12-24.
13. Ionov AA. Features of the allocation of thermal power plants with cross connections by the action of frequ. *Materials of the High School of the International Scientific-Technical Conference "Electric Power Industry through the Eyes of Youth - 2017"*. 2017. pp. 108-111.
14. Karpov AS. Automated system for monitoring the effectiveness of frequency dividing automation. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University*. 2011;4 (135):94-99.
15. Kostin VN. Improving the efficiency of the frequency dividing automation of the power supply system of a megacity. *Technical Sciences - from theory to practice number 10*. 2012. pp. 78-84.
16. Osak AB. Analysis of regime reliability in planning the development of energy systems to justify the costs of reconstruction of the relay protection and automation equipment. *Operational management in the power industry. Staff training and maintenance of its qualification*. 2017;5:49-59.
17. Patrakhin AYU. Modeling of TPP operation under emergency shutdown conditions from the power system. *Collection of scientific works "Scientific projects of educational schools PRDSO - 2016"*. 2016. pp. 62-65.
18. Popov SS. Modernization of emergency control automation for intelligent separation of power plants for balanced load. *Proceedings of the reports of the 12th All-Russian Open Youth Scientific-Practical Conference*. 2017. P. 269-273.
19. Rusakov EA. Modernization of emergency control automation for intelligent allocation of power plants to a balanced load. *Proceedings of the 9th International Scientific-Technical Conference "Electric Power Industry through the Eyes of Youth - 2018"*. 2018. pp. 105-106.
20. Sargsyan KB. Realization of automatic transmission of PGU power unit № 5 of the Razdan Thermal Power Plant to steam power and gas turbine modes. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2019;4:39-44.
21. Fedotov AI. Criteria and algorithms for automating the allocation of TPP to the load of a power district during systemic accidents based on modern microprocessor systems. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2008;7-8:71-78.
22. Firstov PE. Analysis of automatic devices for limiting the reduction of frequency in the energy district of Tverskaya CHPP-4. *Proceedings of the 8th International Scientific-Technical Conference «Electric Power Industry through the Eyes of Youth – 2017»*. 2017. pp. 43-46.

Authors of the publication

Viliya R. Ivanova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Igor Yu. Ivanov – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Vitaly V. Novokreshchenov – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

25 июня 2019 г.



ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОТОКОВ В ГАЗОВОЗДУШНЫХ ТРАКТАХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ТУРБОНАДДУВОМ

Л.В. Плотников, Ю.М. Бродов, Б.П. Жилкин, Н.И. Григорьев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Резюме: Известно, что поршневые двигатели с турбокомпрессором имеют лучшие показатели по удельной мощности, экологичности и экономичности, по сравнению с атмосферными двигателями. В настоящей статье производится сравнительный анализ нестационарной газодинамики и мгновенной локальной теплоотдачи пульсирующих потоков во впускных и выхлопных системах поршневых двигателей внутреннего сгорания в случае установки турбокомпрессора и без него на основе результатов экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились на натурных лабораторных стендах в условиях газодинамической нестационарности. Опыты проводились на одноцилиндровом двигателе размерности 8,2/7,1, оснащенным турбокомпрессором ТКР-6. В статье приводится оригинальная методика определения мгновенных значений локального коэффициента теплоотдачи в трубах, а также описывается процедура проведения исследований. Установлено, что наличие турбокомпрессора в газозоообменнй системе двигателя приводит к значительным отличиям в закономерностях изменения газодинамических и теплообменных характеристик пульсирующих потоков. В частности, показано, что наличие в выхлопной системе турбокомпрессора происходит к подавлению теплоотдачи, а во впускной системе – к интенсификации теплообмена. Полученные новые данные могут использоваться для совершенствования инженерных методик расчета показателей качества процессов газообмена, для доводки рабочих процессов двигателя при установке турбокомпрессора, а также для разработки перспективных газозоообменнй систем ДВС с турбонаддувом.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, турбокомпрессор, система впуска и выхлопа, пульсирующие потоки, внешняя турбулентность, термомеханика потоков

Благодарности: Работа, по результатам которой написана статья, выполнена при поддержке РФФ в рамках научного проекта 18-79-10003.

Для цитирования: Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., Григорьев Н.И. Особенности тепломеханических характеристик пульсирующих потоков в газозоообменнй трактах поршневых двигателей с турбонаддувом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №4. С.77-84. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-77-84.

FEATURES OF HEAT AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PULSATING FLOWS IN GAS-AIR PATHS OF PISTON ENGINES WITH TURBOCHARGING

LV. Plotnikov, YM. Brodov, BP. Zhilkin, NI. Grigoriev

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Abstract: This article provides a comparative analysis of unsteady gas dynamics and instantaneous local heat transfer of pulsating flows in the intake and exhaust systems of reciprocating internal combustion engines in the case of a turbo-compressor installed without it and based on the results of experimental studies. Experimental studies were carried out on full-

scale laboratory stands under the conditions of gas-dynamic nonstationarity. The article provides an original method for determining the instantaneous values of the local heat transfer coefficient in pipes, and describes the procedure for conducting experiments. It has been established that the presence of a turbo compressor in the gas-air system of a piston engine leads to significant differences in the patterns of changes in the gas-dynamic and heat exchange characteristics of pulsating flows. The obtained new data can be used to improve engineering methods for calculating the quality indicators of gas exchange processes, to refine the working processes of the engine when installing a turbocharger, as well as to develop advanced gas-air ICE systems with turbocharging.

Keywords: *internal combustion engine, turbocharger, intake and exhaust system, pulsating flows, external turbulence, flow thermomechanics*

Acknowledgments: *the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No. 18-79-10003).*

For citation: Plotnikov LV, Brodov YM, Zhilkin BP, Grigoriev NI. Features of heat and mechanical characteristics of pulsating flows in gas-air paths of piston engines with turbocharging. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):77-84. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-77-84.

Введение

Оснащение двигателей внутреннего сгорания (ДВС) системой турбонаддува является основной тенденцией развития поршневого двигателестроения. Это связано с рядом положительных эффектов, таких как улучшение удельной мощности, экологичности и экономичности ДВС. Анализ литературы показывает, что многие специалисты рассматривают установку турбокомпрессора (ТК) в газоздушную систему ДВС исключительно как метод увеличения расхода рабочего тела через цилиндры двигателя и, соответственно, улучшения его эксплуатационных показателей [1–3]. Однако в публикациях по этой тематике уделяется недостаточно внимания вопросу влияния ТК на тепломеханические характеристики пульсирующих потоков в газоздушных системах ДВС. Однако, можно предположить, что лопаточный аппарат ТК будет оказывать механическое воздействие на течение, являясь источником внешней турбулентности, что может привести к существенному изменению тепломеханических характеристик потока газов во впускной и выхлопной системах ДВС. Обзор современных исследований в области термомеханики газовых потоков в системах турбонаддува свидетельствует о большом интересе специалистов к данной тематике. Существуют работы, которые посвящены анализу эффективности разных систем наддува [4], исследованию процессов теплообмена и газодинамики в ТК с учетом нестационарности течения газов [5], разработке методов прогнозирования параметров газов в ТК [6, 7], изучению влияния конфигурации каналов турбокомпрессора на эффективность работы двигателя с турбонаддувом [8–10].

В данной статье представлен сравнительный анализ экспериментальных данных о тепломеханических характеристиках пульсирующих потоков в системах впуска и выхлопа поршневого двигателя при установке турбокомпрессора и без него. Исследования проводились с учетом газодинамической нестационарности и влияния внешней турбулентности (механического воздействия на течение).

Материалы и методы

Для изучения закономерностей изменения газодинамики и локального теплообмена пульсирующих потоков во впускных и выхлопных системах использовались экспериментальные стенды, состоящие из одноцилиндрового поршневого двигателя (диаметр цилиндра – 82 мм, ход поршня – 71 мм) и системы турбонаддува. Привод коленвала осуществлялся с помощью электрического асинхронного двигателя с возможностью регулирования его скорости вращения частотным преобразователем в диапазоне от 600 до 3000 мин⁻¹. Стенд оснащался турбокомпрессором ТКР-6. Скорость вращения ротора ТК $n_{\text{ТК}}$ регулировалась в диапазоне от 35 000 до 46 000 мин⁻¹ за счет изменения расхода сжатого воздуха, поступающего на лопатки турбины ТК. Подробное описание экспериментальных стендов представлено в работе [11].

Для измерения физических величин в ходе проведения опытов использовалась автоматизированная система сбора и обработки экспериментальных данных. Сбор данных осуществлялся одновременно по четырем каналам аналого-цифрового преобразователя

(скорость, давление, локальный коэффициент теплоотдачи и скорость вращения). Метод термоанемометрирования (термоанемометр постоянной температуры) использовался как для определения мгновенных величин скорости потока воздуха w_x , так и локального коэффициента теплоотдачи α_x . Подробней метод определения скорости потока и локального коэффициента теплоотдачи применительно к данному исследованию описан в работе [12]. Определение скоростей вращения коленвала n и ротора турбокомпрессора $n_{\text{ТК}}$ производились тахометрами. Быстродействующие датчики давления использовались для определения мгновенных значений статического давления потока с погрешностью 0,5 %. Максимальная систематическая погрешность экспериментов при измерении w_x составляла 5,4 %, а при определении α_x – 10,0 %.

Исследования проводились в круглой прямой трубе (длиной 300 мм). Внутренний диаметр впускной трубы составлял 32 мм, выхлопной – 30 мм. Контрольное сечение с датчиками располагалось на расстоянии 150 мм от окна в головке цилиндров.

Результаты и обсуждение

Сначала рассмотрим особенности газодинамики и теплоотдачи пульсирующих потоков во впускной системе поршневого двигателя с турбокомпрессором. На рис. 1 и 2 показаны закономерности изменения местных скорости и давления потока воздуха во впускных трубах поршневого ДВС с турбокомпрессором и без него (атмосферный двигатель) от угла поворота коленвала φ при разных скоростях вращения n .

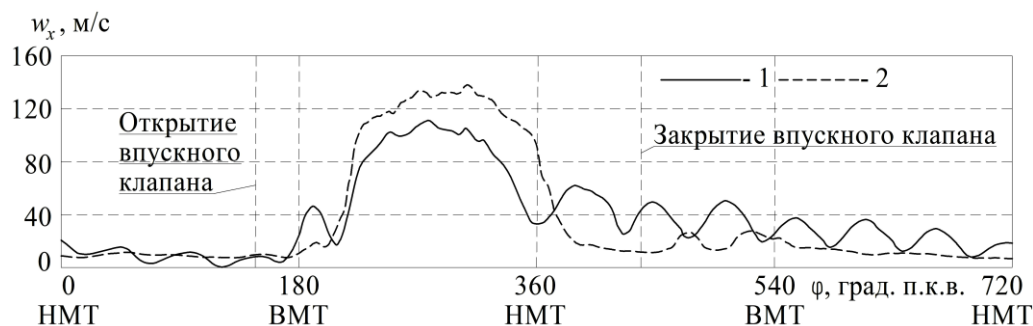


Рис. 1. Зависимость местной ($l_x = 140$ мм) скорости воздуха w_x во впускной трубе двигателя без турбокомпрессора (1) и с ТК (2) от угла поворота коленвала φ при скорости вращения ротора турбокомпрессора $n_{\text{ТК}} = 35000 \text{ мин}^{-1}$ и скорости вращения коленвала $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

Из рис. 1 видно, что на зависимостях $w_x = f(\varphi)$ в двигателе с ТК после открытия впускного клапана отсутствует единичное колебание воздуха сразу после открытия впускного клапана, а процесс наполнения является более плавным (без флуктуаций). По мнению авторов, это объясняется тем, что турбокомпрессор создает избыточное давление во впускной трубе, которое превышает барометрическое и внутрицилиндровое давление. Поэтому в этом случае поле скоростей в трубе в основном определяется работой лопаточного аппарата компрессора ТК. Максимальные значения скорости потока воздуха во впускной трубе в двигателе с турбокомпрессором выше на 15–25 %, чем в атмосферном ДВС. С ростом скорости вращения ротора ТК отличия в максимальных значениях скорости потока воздуха также увеличиваются и достигают 50 % при $n_{\text{ТК}} = 45000 \text{ мин}^{-1}$.

Следует отметить, что скорость потока воздуха во впускной трубе не становится равной нулю после закрытия впускного клапана, а имеют место затухающие колебательные пульсации w_x . Эти пульсации особенно характерны для впускной трубы атмосферного двигателя, тогда как в ДВС с ТК данные колебания фактически отсутствуют.

Аналогичные затухающие колебания пульсаций давления потока после закрытия клапана обнаружены во впускной трубе (рис. 2), которые также наиболее характерны для атмосферных двигателей. При этом во впускной трубе двигателя с турбокомпрессором наблюдаются небольшие флуктуации давления потока в течение всего рабочего цикла, вызванные работой лопаточного аппарата ТК [13, 14]. Можно отметить наличие общей закономерности изменения функции $p_x = f(\varphi)$ во впускной системе для двигателей с турбокомпрессором и без него во время процесса впуска.

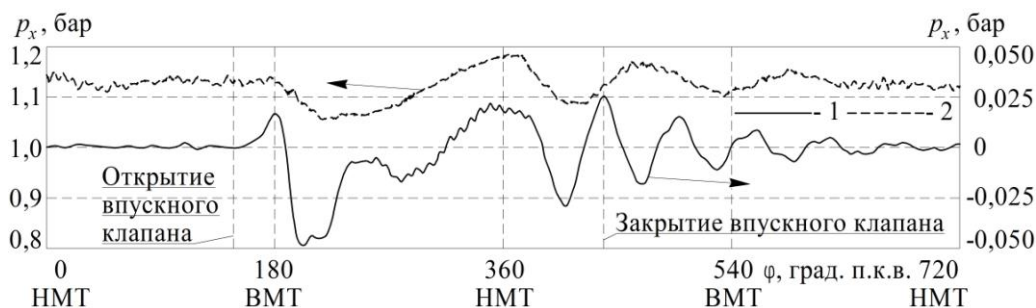


Рис. 2. Зависимость местного ($l_x = 140$ мм) давления воздуха p_x во впускной трубе двигателя без турбокомпрессора (1) и с ТК (2) от угла поворота коленвала φ при скорости вращения ротора турбокомпрессора $n_{\text{тк}} = 35000 \text{ мин}^{-1}$ и скорости вращения коленвала $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

Установлено, что во впускной трубе поршневого ДВС с турбокомпрессором, в отличие от атмосферного двигателя, при всех скоростях вращения ротора ТК возрастают как максимальные значения α_x , так и средние его значения (рис. 3).

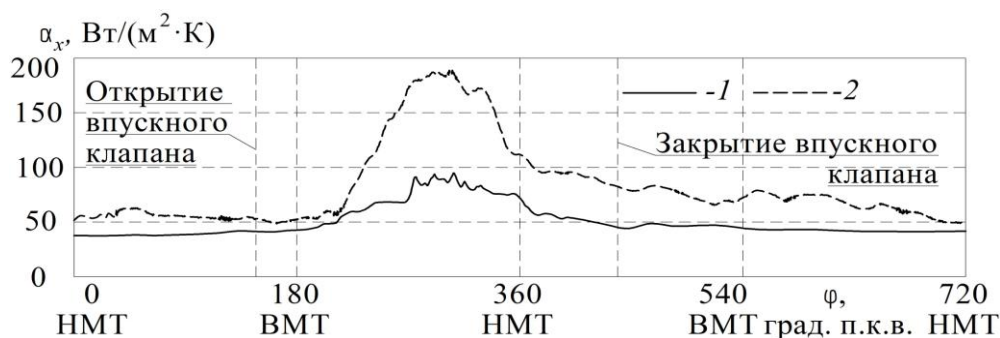


Рис. 3. Зависимость локальных ($l_x = 150$ мм) коэффициентов теплоотдачи α_x во впускной трубе ДВС без турбокомпрессора (1) и с ТК (2) от угла поворота коленвала φ при скорости вращения ротора турбокомпрессора $n_{\text{тк}} = 35000 \text{ мин}^{-1}$ и скорости вращения коленвала $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

Например, при скорости вращения коленвала 600 мин^{-1} максимальные значения локального коэффициента теплоотдачи во впускной трубе ДВС с ТК почти в 2 раза выше, чем в атмосферном двигателе, а при скорости $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ отличие достигает 75 %. По мнению авторов, рост интенсивности теплоотдачи во впускной трубе, связан не только с увеличением скорости потока, но и с влиянием механического воздействия лопаточного аппарата на основное течение. Известно, что повышение α_x может привести к росту термической напряженности деталей и узлов впускной системы ДВС [11].

Следует отметить, что во впускной трубе ДВС с турбокомпрессором при всех n и $n_{\text{тк}}$ имеют место пульсации локального коэффициента теплоотдачи в течение всего рабочего цикла. При этом они имеют большую амплитуду, чем в атмосферном двигателе (без ТК). Обнаружено, что при наличии ТК, по сравнению с атмосферным двигателем, максимум локальной теплоотдачи во впускной трубе наступает раньше на угол $\Delta\varphi = 10^\circ$ при скорости $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, при этом увеличивается до угла $\Delta\varphi = 40^\circ$ при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$.

Далее рассмотрим особенности газодинамики и теплоотдачи пульсирующих потоков в выхлопной системе поршневого двигателя с турбокомпрессором. Зависимости локальной скорости w_x и давления p_x потока в выхлопной системе ДВС (с ТК и без) от угла поворота коленвала φ при разных n показаны на рис. 4 и 5.

Установлено, что значения максимальной скорости потока воздуха в выхлопной трубе с ТК меньше, чем в трубе атмосферного ДВС. Наибольшие отличия имеют место при избыточном давлении на выходе p_b равном 0,1 МПа – они достигают 40 %. При этом в обоих случаях (системах с турбокомпрессором и без) присутствуют пульсации скорости потока воздуха, которые имеют большие амплитуды при низких скоростях вращения коленвала. Также можно отметить наличие смещения максимума характеристики $w_x = f(\varphi)$ для системы выхлопа с ТК в сторону увеличения угла поворота коленвала.

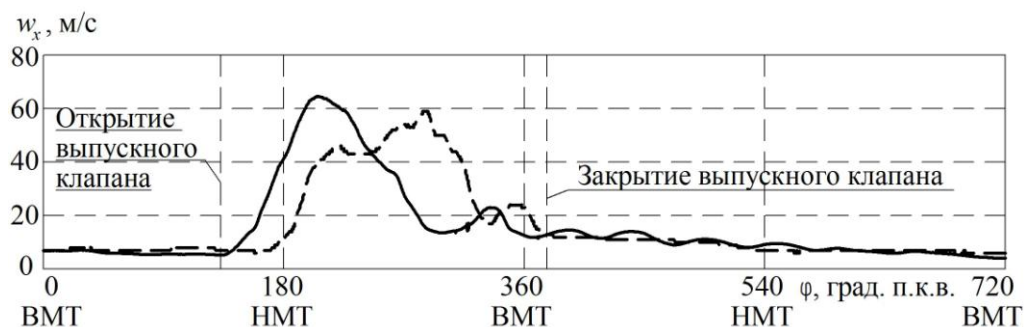


Рис. 4. Зависимость местной ($l_x = 140$ мм) скорости воздуха w_x в выхлопной трубе ДВС без турбокомпрессора (1) и с ТК от угла поворота коленвала φ при давлении выхлопа $p_b = 0,1$ МПа для скорости вращения коленвала $n = 3000$ мин⁻¹

Аналогичные отличия имеют место и в закономерностях изменения давления пульсирующего потока в системе выхлопа с ТК (рис. 5), а именно: 1) максимальные значения давления потока воздуха выше вплоть до 3 раз при наличии ТК, чем в системе выхлопа атмосферного двигателя; 2) наблюдается смещение пика максимума давления по углу в сторону закрытия клапана на $\Delta\varphi$ от 30 до 50 градусов поворота коленвала.

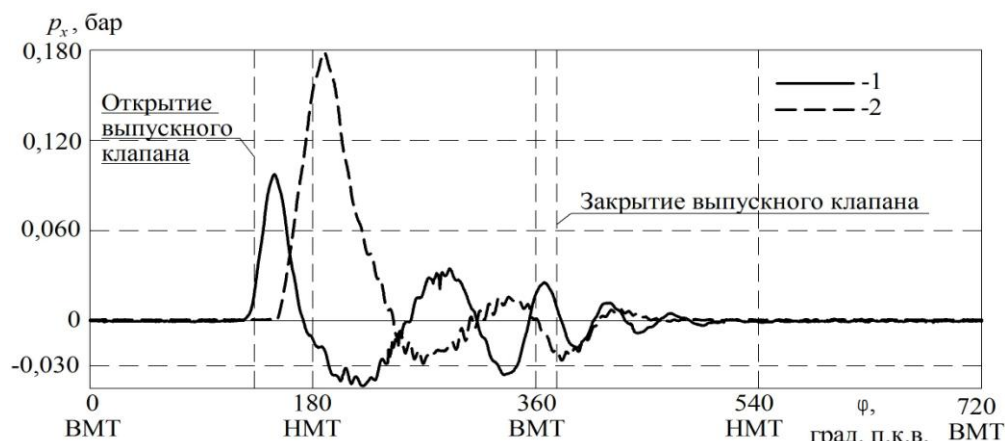


Рис. 5. Зависимость местного ($l_x = 140$ мм) давления воздуха p_x в выхлопной трубе ДВС без ТК (1) и с ТК (2) от угла поворота коленвала φ при давлении выхлопа $p_b = 0,2$ МПа для скорости вращения коленвала $n = 1500$ мин⁻¹

Установлено, что после закрытия клапана скорость воздуха в выхлопной трубе не обращается в нуль, а имеют место затухающие колебания пульсаций w_x . При этом наличие турбокомпрессора в системе выхлопа приводит к некоторому сглаживанию амплитуд пульсаций скорости потока в течение всего рабочего процесса двигателя.

Также в системе выхлопа были обнаружены затухающие колебания пульсаций p_x после закрытия выхлопного клапана, которые имели значительно меньшую амплитуду (вплоть до 50 %) при наличии в системе ТК. Подобные затухающие процессы были получены ранее для систем впуска и выхлопа (ДВС без турбокомпрессора) с разными гидравлическими сопротивлениями [15].

По мнению авторов столь существенные изменения в газодинамике потока воздуха в выхлопной трубе связаны с механическим воздействием лопаточного аппарата центробежного компрессора на пульсирующий поток, что вызывает изменение структуры потока по сечению трубы, деформацию пограничного слоя и перестройку газодинамической структуры потока. Эти явления должны привести к изменениям в теплообменных характеристиках пульсирующего потока.

Установлено (рис. 6), что при наличии турбокомпрессора в системе выхлопа происходит снижение максимальных значений локального коэффициента теплоотдачи α_x в выхлопной трубе на величину от 10 до 30 % по сравнению с атмосферным двигателем. При установке турбокомпрессора наблюдается также снижение средних значений локального коэффициента теплоотдачи в трубе в диапазоне от 10 до 20 % в сравнении с ДВС без ТК.

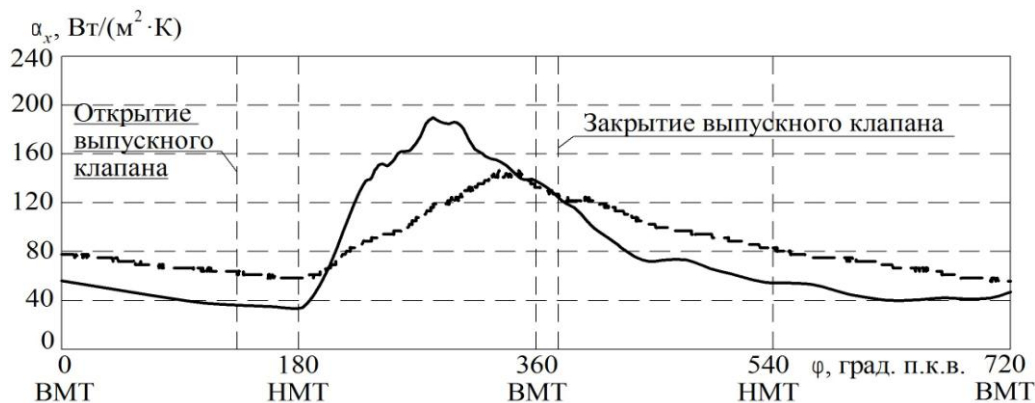


Рис. 6. Зависимость локальных ($l_x = 150$ мм) коэффициентов теплоотдачи α_x в выхлопной трубе двигателя без ТК (1) и с ТК (2) от угла поворота коленвала φ при давлении выхлопа $p_b = 0,2$ МПа для скорости вращения коленвала $n = 3000$ мин⁻¹

Снижение интенсивности локальной теплоотдачи в двигателе с ТК должно привести к уменьшению термических напряжений в деталях и узлах системы выхлопа, а также повышению эффективности работы турбокомпрессора.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие основные выводы.

1. Установлено, что наличие ТК в газозоообменной системе поршневого ДВС приводит к значительным изменениям газодинамики пульсирующих потоков, а именно:

- максимальные значения скорости потока воздуха во впускной трубе в двигателе с турбокомпрессором выше на величину 10–50 %, чем в атмосферном ДВС (w_x достигает значений до 180 м/с в случае установки ТК);

- в выхлопной системе с ТК значения максимальной скорости потока воздуха, наоборот, меньше, чем в трубе без него, — наибольшее падение w_x достигает 40 %.

2. Показано, что при наличии в выхлопной системе турбокомпрессора происходит к снижению интенсивности теплоотдачи в трубе на величину до 20 %. Во впускной трубе ДВС с ТК, в отличие от атмосферного двигателя, возрастают как максимальные значения локального коэффициента теплоотдачи (до 2 раз), так и его средние значения (до 45 %).

3. Полученные новые данные могут использоваться для уточнения инженерных методик расчета показателей качества газозоообмена ДВС, а также для разработки перспективных систем впуска и выхлопа для двигателей с турбонаддувом.

Литература

1. Байков Б.П., Бордуков В.Г. Турбокомпрессоры для наддува дизелей. Ленинград: Машиностроение, 1982. 200 с.
2. Круглов М.Г., Дехович Д.А., Иванов Г.И. Агрегаты для воздухоообменения комбинированных двигателей внутреннего сгорания. Москва: Машиностроение, 1973. 296 с.
3. Хак Г. Турбодвигатели и компрессоры. Москва: ООО Издательство «Астрель – АСТ», 2003. 351 с.
4. Comparison and analysis of the effects of various improved turbocharging approaches on gasoline engine transient performances // Applied Thermal Engineering. 2016. V. 93, pp. 797-812.
5. Lee J., Tan C.S., Sirakov B.T., et al. Performance metric for turbine stage under unsteady pulsating flow environment // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2017. V. 139, N 7.
6. An extended calculation approach of exhaust thermocouple temperatures in one-dimensional gas exchange simulation for turbocharged gasoline direct-injection engines // International Journal of Engine Research. 2018. V. 19. N 4. pp. 449-460.
7. Huang L., Ma C., Li Y., Gao J., Qi M. Applying neural networks (NN) to the improvement of gasoline turbocharger heat transfer modeling // Applied Thermal Engineering. 2018. V. 141. pp. 1080-1091.
8. Galindo J., Tiseira A., Navarro R., Tari D., Meano C.M. Effect of the inlet geometry on performance, surge margin and noise emission of an automotive turbocharger compressor // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 110. pp. 875-882.
9. Шестаков Д.С. Доводка рабочего процесса тепловозных дизелей 8ДМ21/21 с

турбокомпрессорами типоразмера TCR // Двигателестроение. 2017. № 3. С. 9-13.

10. Wang T.J. Optimum design for intake and exhaust system of a heavy-duty diesel engine by // Journal of Mechanical Science and Technology. 2018. V. 32. N 7. pp. 3465-3472.

11. Жилкин Б.П., Лашманов В.В., Плотников Л.В., Шестаков Д.С. Совершенствование процессов в газоздушных трактах поршневых двигателей внутреннего сгорания: монография; под общ. ред. Ю. М. Бродова. Екатеринбург: Издательство Уральского . университета, 2015. 228 с.

12. Plotnikov L.V. Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 160.

13. Д.С. Шестаков, Л.В. Плотников, Б.П. Жилкин, Н.И. Григорьев Снижение пульсации потока во впускной системе поршневого ДВС с наддувом // Двигателестроение. 2013. № 1. С. 24-27.

14. Жилкин Б.П. Некоторые особенности газодинамики процесса выпуска при наддуве поршневых ДВС // Тяжелое машиностроение. 2012. № 2. С. 48-51.

15. Плотников Л.В., Жилкин Б.П., Крестовских А.В, Падаляк Д.Л. Об изменении газодинамики процесса выпуска в поршневых ДВС при установке глушителя // Вестник академии военных наук. 2011. № 2. С. 267-270.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: plotnikovlv@mail.ru.

Бродов Юрий Миронович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: turbine66@mail.ru.

Жилкин Борис Прокопьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: tot@ustu.ru.

Григорьев Никита Игоревич – доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: gepebola3@mail.ru.

References

1. Bajkov BP., Bordukov V.G. *Turbochargers for supercharged diesel engines: a reference guide*. Leningrad: Mechanical Engineering. 1982.

2. Kruglov MG., Dekhovich DA., Ivanov GI. Air supply units for combined internal combustion engines. Moscow: Mechanical Engineering. 1973.

3. Hak G. *Turbo engines and compressors: reference manual*. Moscow: Publishing house «Astrel – AST». 2003.

4. Tang Q., Fu J., Liu J., et al. Comparison and analysis of the effects of various improved turbocharging approaches on gasoline engine transient performances. *Applied Thermal Engineering*. 2016;93:797-812.

5. Lee J., Tan CS., Sirakov BT., et al. Performance metric for turbine stage under unsteady pulsating flow environment. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2017;139(7).

6. Franzke B., Adomeit P, Uhlmann T., et al. An extended calculation approach of exhaust thermocouple temperatures in one-dimensional gas exchange simulation for turbocharged gasoline direct-injection engines. *International Journal of Engine Research*. 2018;19(4):449-460.

7. L. Huang C. Ma ., Li Y., Gao J., Qi M. Applying neural networks (NN) to the improvement of gasoline turbocharger heat transfer modeling. *Applied Thermal Engineering*. 2018;(141):1080-1091.

8. Galindo J., Tiseira A., Navarro R., Tarí D., Meano C.M. Effect of the inlet geometry on performance, surge margin and noise emission of an automotive turbocharger compressor. *Applied Thermal Engineering*. 2017;110:875-882.

9. Shestakov DS. Fine-tuning of the working process of diesel engines 8DM21/21 with turbochargers size TCR . *Dvigatelistroyeniye*. 2017;3:9-13.

10. Wang TJ. Optimum design for intake and exhaust system of a heavy-duty diesel engine by using DFSS methodology. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018;32(7):3465-3472.

11. Zhilkin BP., Lashmanov VV., Plotnikov LV., et al. *Improvement of processes in gas-air paths of internal combustion piston engines*: monograph. Ekaterinburg: Publishing House 2015. 228 p.

12. Plotnikov LV. Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas

flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 160.

13. Shestakov DS., Plotnikov LV., Zhilkin BP., Grigoriev NI. Reduction of flow pulsation in the intake system of the supercharged piston ICE. *Dvigatelsestroyeniye*, 2013;1:24-27.

14. Zhilkin BP. Some features of the gas dynamics of the intake process in a piston engine with supercharging. *Heavy engineering*. 2012;2:48-51.

15. Plotnikov LV., Zhilkin BP., Krestovskih AV., Padalyak D.L. On the change in the gas dynamics of the exhaust process in piston ICEs when installing a silencer. *Bulletin of the Academy of military Sciences*. 2011;2:267-270.

Authors of the publication

Leonid V. Plotnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Boris P. Zhilkin – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Yurii M. Brodov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Nikita I. Grigoriev – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Поступила в редакцию

22 июля 2019 г.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХПРОВОДНОЙ ЛЭП

Г.А. Большанин, М.П. Плотников, М.А. Шевченко

Братский государственный университет, г. Братск, Россия
ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4017-6732> plotnikov_m.p@mail.ru
shevchenkomix@hotmail.com

Резюме: Для определения результатов передачи электрической энергии по линии электропередачи (ЛЭП) от источника к потребителю необходимо иметь точные сведения о параметрах данной линии. Определить эти параметры для действующих линий с минимальной погрешностью достаточно трудоёмко. Но если исследователя интересуют лишь напряжения и токи в конце и в начале однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения, то для этого достаточно использовать теорию многополюсников. В частности, теорию восьмиполюсников. В статье представлена методика экспериментального определения продольных и поперечных параметров исследуемой ЛЭП. В исследовании использовались методы натурного эксперимента с использованием соответствующего парка электроизмерительных приборов, методы косвенного измерения искомых величин. Эксперимент состоит из шести этапов, на основании полученных данных появляется возможность определить численные значения основных параметров исследуемого участка ЛЭП, с учетом которых возможно установить количественную связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии. Кроме того, описываемая методика, в принципе, может быть применена и для анализа активных восьмиполюсников подобного исполнения. Это значит, что предлагаемая методика может обеспечить всесторонний анализ исследуемого объекта и поможет идентифицировать параметры воздушной ЛЭП на этапе строительства или ее подключения для потребителя. В статье представлена схема опытной установки, описаны методики проведения опытов, оценена погрешность результатов расчета.

Ключевые слова: восьмиполюсник, экспериментальное определение параметров восьмиполюсников, напряжение, ток, трёхпроводная ЛЭП.

Благодарности: Особую благодарность в написании статьи авторы выражают Большанину Г.А.

Для цитирования: Большанин Г.А., Плотников М.П., Шевченко М.А. Экспериментальное определение параметров трёхпроводной ЛЭП // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С. 85-94. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-85-94.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE EIGHT-POLE

G.A. Bol'shanin, M.P. Plotnikov, M.A. Shevchenko

Bratsk State University, Bratsk, Russia
ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4017-6732> plotnikov_m.p@mail.ru
shevchenkomix@hotmail.com

Abstract: To determine the results of the transmission of electrical energy through the power line from the source to the consumer, it is necessary to have accurate information about the parameters of such line. Determining these parameters for operating lines with a minimum error is quite a laborious process. But if a researcher is interested only in voltages and currents at the end and at the beginning of a homogeneous section of a three-wire transmission line, then it is sufficient to use the theory of multipoles. In particular, the theory of eight-poles. The article presents the method of experimental determination of the longitudinal and transverse parameters of the studied transmission line. The study used the methods of natural experiment using an

appropriate fleet of electrical devices, and methods of indirect measurement of the desired parameters. The experiment consists of six stages; on the basis of the obtained data, it becomes possible to determine the numerical values of the main parameters of the studied section of power transmission lines, with which it is possible to establish a quantitative relationship between the input and output characteristics of electrical energy. In addition, the described method, in principle, can be applied to the analysis of active eight-terminal networks of a similar design. This means that the proposed methodology can provide a comprehensive analysis of the studied object and will help to identify the parameters of an overhead power line at the construction stage or for its connection to the consumer. The article presents the experimental setup scheme, describes the experimental methods, and estimates the error of the calculation results.

Keywords: *eight-pole, experimental determination of the parameters of eight-pole, voltage, current, three-wire power lines.*

For citation: Bol'shanin GA, Plotnikov MP, Shevchenko MA. Experimental determination of the parameters of the eight-pole. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):85-94. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-85-94.

Введение

Для определения результатов передачи электрической энергии по линии электропередачи от источника к потребителю необходимо иметь точные сведения о параметрах данной линии.

В соответствии с существующей практикой определение параметров воздушных линий (ВЛ) производится с использованием справочных данных по удельным характеристикам для соответствующих типов проводов и класса напряжения с учетом длины ВЛ.

Справочная литература¹ типа дает весьма ориентировочные сведения о первичных параметрах, как правило, отличающиеся от реальных. Определение первичных параметров ЛЭП по методикам, аналогичным описанным в литературе [1–7], технически трудноосуществимо, поскольку предполагает наличие сведений о специфических факторах. А их множество. И учет всех этих факторов представляет собой трудоемкую задачу, решение которой не всегда обеспечивает оперативность получения достоверных результатов. Наиболее достоверные сведения о первичных параметрах однородного участка ЛЭП позволяют получить экспериментальные исследования [8–14]. Но здесь могут возникнуть как технические, так и организационные сложности. В данном случае приходится искать возможные альтернативные решения.

При этом если исследователю требуется определить лишь напряжения и токи в конце и в начале однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения, то для получения результатов передачи электрической энергии по исследуемому участку ЛЭП можно использовать теорию многополюсников, в частности, теорию восьмиполюсников [15–17].

Материалы и методы исследования

Однородный участок ЛЭП трехпроводного исполнения может быть замещен восьмиполюсником (рис. 1).

Многополюсник, в данном случае восьмиполюсник, является для исследователя «черным ящиком», для которого описаны входные и выходные параметры. Для определения свойств исследуемого восьмиполюсника требуется провести серию экспериментов.

Вариантов исполнения экспериментальной установки для определения численных значений восьмиполюсника может быть множество. Схемное решение одного из вариантов исполнения такой экспериментальной установки изображено на рис. 2.

¹ Электротехнический справочник в 4-х т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии. / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). 9-е изд., стер. М.: Издательство МЭИ, 2004. с. 197-198, 201-202.

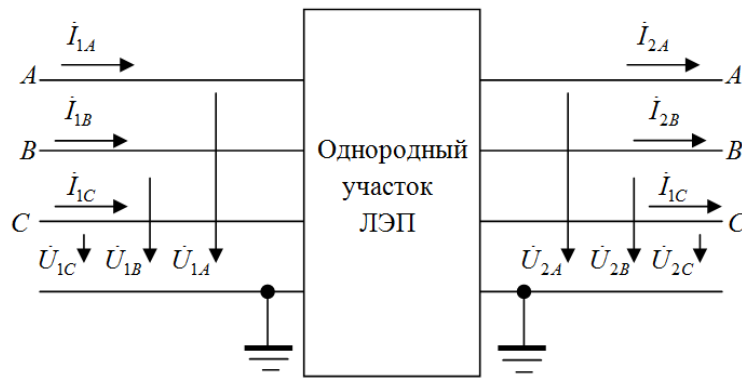


Рис. 1. Восьмиполюсник, замещающий однородный участок ЛЭП трехпроводного исполнения

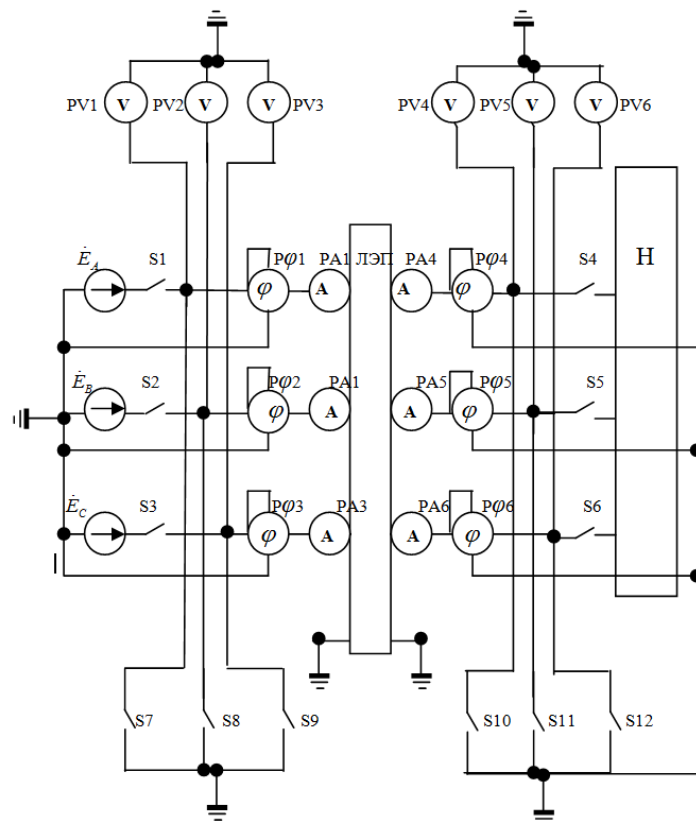


Рис. 2. Схема серии экспериментов для определения коэффициентов восьмиполюсника, замещающего однородный участок трехпроводной ЛЭП

В данной схеме участвуют: источник трехфазной ЭДС $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$ и $\dot{E}_C$ или три источника однофазных, равных по величине ЭДС, начальные фазы которых сдвинуты относительно друг друга на треть периода, желательного пониженного напряжения; шесть вольтметров $PV1 - PV6$; шесть амперметров $PA - PA6$; шесть фазометров $P\phi 1 - P\phi 6$; двенадцать коммутирующих устройств $S1 - S12$, в качестве которых могут быть использованы обычные выключатели или рубильники.

В качестве нагрузки H может быть использован практически любой трехфазный потребитель электрической энергии или три однофазных. На качество экспериментов тип потребителя практически не окажет никакого влияния.

Для определения искомых коэффициентов надо выполнить серию экспериментов из 6 (шести) опытов. Целью этих опытов является определение параметров восьмиполюсника, а также определение изображений на комплексной плоскости входных и выходных напряжений и токов при различных режимах работы анализируемого восьмиполюсника.

Первый опыт может быть выполнен в обычном состоянии однородного участка ЛЭП, в режиме передачи электрической энергии нагрузке H .

При выполнении этого опыта ключи $S1 - S6$ должны быть замкнуты, а ключи $S7 -$

S12 – разомкнуты.

В качестве источника энергии в этом опыте может быть использован как автономный генератор трехфазной ЭДС пониженного напряжения, так и действующая электроэнергетическая система. Нужно только подобрать соответствующие электроизмерительные приборы.

Модули входных фазных напряжений U_{1A1} , U_{1B1} и U_{1C1} регистрируют вольтметры PV1 – PV3, а выходных: U_{2A1} , U_{2B1} и U_{2C1} – вольтметры PV4 – PV6.

Модули входных линейных токов I_{1A1} , I_{1B1} и I_{1C1} регистрируют амперметры PA1 – PA3, а выходных: I_{2A1} , I_{2B1} и I_{2C1} – амперметры PA4 – PA6.

Фазометры Pφ1 – Pφ6, если они подключены к исследуемой ЛЭП так, как показано на рис. 2, регистрируют разность начальных фаз соответствующих напряжений и токов. Так, фазометр Pφ1 регистрирует разность начальных фаз напряжения U_{1A1} и тока I_{1A1} : $\varphi_1 = \varphi_{1uA1} - \varphi_{1iA1}$; фазометр Pφ2 – разность начальных фаз напряжения U_{1B1} и тока I_{1B1} : $\varphi_2 = \varphi_{1uB1} - \varphi_{1iB1}$; фазометр Pφ3 – разность начальных фаз напряжения U_{1C1} и тока I_{1C1} : $\varphi_3 = \varphi_{1uC1} - \varphi_{1iC1}$; фазометр Pφ4 – разность начальных фаз напряжения U_{2A1} и тока I_{2A1} : $\varphi_4 = \varphi_{2uA1} - \varphi_{2iA1}$; фазометр Pφ5 – разность начальных фаз напряжения U_{2B1} и тока I_{2B1} : $\varphi_5 = \varphi_{2uB1} - \varphi_{2iB1}$; фазометр Pφ6 – разность начальных фаз напряжения U_{2C1} и тока I_{2C1} : $\varphi_6 = \varphi_{2uC1} - \varphi_{2iC1}$.

На основании схемы эксперимента (рис. 2) аналогично первому опыту проводятся остальные пять опытов: опыт холостого хода – он предполагает отключение от конца исследуемой линии электропередачи электрической нагрузки H . Для этого необходимо разомкнуть ключи S4 – S6. Кроме того, должны быть разомкнуты ключи S7 – S12. Ключи S1 – S3 должны остаться замкнутыми. Опыт короткого замыкания фазы A на землю, данный опыт отличается от второго тем, что замыкается ключ S10. Остальные ключи остаются в прежнем состоянии. И остальные опыты короткого замыкания фазы B , фазы C и фаз B, C на землю проводятся аналогично.

Эксперимент

На базе кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета был проведен эксперимент по определению численных значений коэффициентов восьмиполюсника с применением соответствующего парка электроизмерительных приборов и модели воздушной линии электропередачи. На рис. 3 показана фотография стенда испытательной установки.

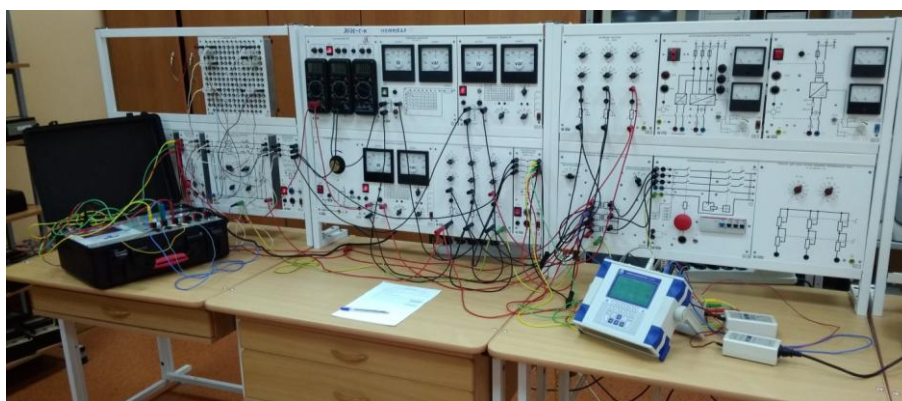


Рис. 3. Фотография экспериментальной установки

Параметры модели воздушной линии представлены в табл. 1, схема модели линии показана на рис. 4. Связи между фазными проводами модели воздушной линии были учтены включением конденсаторов емкостью 0,1 мкФ по схеме рис. 4.

С целью исключения некорректных показаний, вызванных некачественной электроэнергией из сети авторами было принято решение использовать программируемый трехфазный источник синусоидальной ЭДС «Энергоформа 3.3».

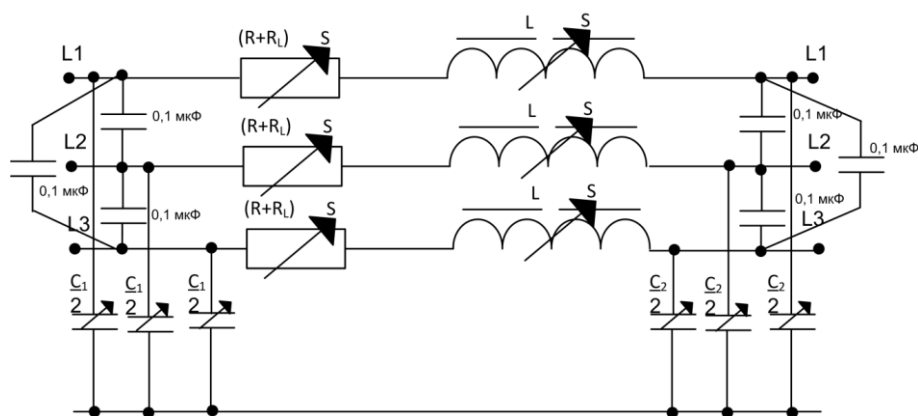


Рис. 4. Схема модели исследуемой ВЛ

Измерение требуемых входных и выходных параметров исследуемой модели ЛЭП производилось с помощью прибора для измерения электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии «Энергомонитор-3.3Т1».

Методика экспериментального определения продольных и поперечных параметров исследуемого восьмиполусника однотипна для всех трёх фаз исследуемой ВЛ, поэтому в дальнейшем в статье будет рассмотрен вариант расчета для фазного провода *A*. Следовательно, целесообразно представить в статье всего три опыта: работа воздушной линии в режиме нагрузки, опыт холостого хода и опыт короткого замыкания фазы *A* на землю. Полученные данные трёх экспериментов сведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Параметры модели исследуемой воздушной линии электропередачи

R , Ом	L/R_L , Гн/Ом	$C_1/2$	$C_2/2$
0	1,2/32	0,58	0,58

Таблица 2

Входные параметры модели исследуемой воздушной линии опыт 1

Измеряемая фаза	U , в	I , mA	φ , Град.	Ψ_U , Град.	Ψ_I , Град.	
<i>A</i>	7,13	7,24	-7,14	0	7,14	Угол между U_a-I_b , Град. 111
<i>B</i>	7,16	7,38	-7,32	-118,32	-111	
<i>C</i>	7,2	7,51	-6,99	123,03	128	Угол между U_a-I_c , Град. -128

Опыт 1. Работа воздушной линии в режиме нагрузки. Полученные в ходе эксперимента данные приведены в табл. 2, 3.

Таблица 3

Выходные параметры модели исследуемой воздушной линии опыт 1

Измеряемая фаза	U , в	I , mA	φ , Град.	Ψ_U , Град.	Ψ_I , Град.	
<i>A</i>	7,02	7,12	0,038	-22,262	-22,3	Угол между U_a-I_a , Град. 22,3
<i>B</i>	7,04	7,16	-0,02	140,282	140,262	Угол между U_a-I_b , Град. 118
<i>C</i>	7,05	7,27	-0,04	98,698	98,738	Угол между U_a-I_c , Град. 22,3

На основании полученных данных при помощи законов Кирхгофа и схемы замещения восьмиполусника появляется возможность для определения численных значений продольных и поперечных параметров, характеризующих состояние пассивного восьмиполусника с четырьмя входными и четырьмя выходными выводами. Использование полученных значений параметров 8-полусника позволит установить количественную связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии, каковыми являются напряжения и токи в начале и конце исследуемого участка ЛЭП.

Методика расчета продольных и поперечных параметров исследуемого участка ВЛ. Определение погрешности метода. Результаты эксперимента

Исследуемый восьмиполосник можно представить в виде П-образной схемы замещения, показанной на рис. 5.

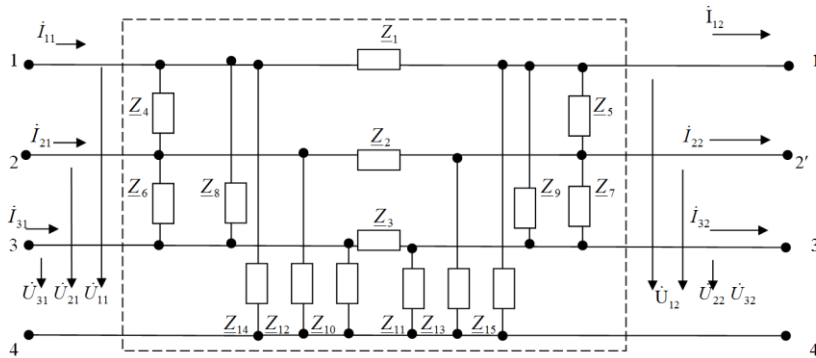


Рис. 5. Схемное решение пассивного восьмиполосника с четырьмя входными и четырьмя выходными выводами П-образного исполнения

На рис. 5 символы Z_1 , Z_2 , Z_3 иллюстрируют продольные сопротивления линейных проводов фаз А, В, С соответственно, замещающие продольные параметры однородного участка ЛЭП трёхпроводного исполнения; символы Z_4 , Z_6 , Z_8 – волновые сопротивления между линейными проводами в начале воздушной линии; символы Z_{10} , Z_{12} , Z_{14} – волновые сопротивления между линейными проводами и заземленными конструктивными элементами ЛЭП, замещающие поперечные параметры в начале воздушной линии.

Символы i_{11} , i_{21} , i_{31} иллюстрируют ток, протекающий в фазных проводах исследуемой ЛЭП; символы $\dot{U}_{11}$, $\dot{U}_{21}$, $\dot{U}_{31}$ – падение напряжения в начале исследуемого участка ВЛ [15]; символы Z_5 – Z_{15} , i_{12} – i_{32} , $\dot{U}_{12}$ – $\dot{U}_{32}$ – аналогичные параметры в конце исследуемого участка ВЛ.

Расчет продольных параметров исследуемого участка ВЛ

Волновое сопротивление линейного провода фазы А определяется по формуле

$$Z_1 = \frac{U_{1A}^{(3)}}{I_{2A}^{(3)}},$$

где $U_{1A}^{(3)}$ – напряжение в фазе А в начале исследуемого участка, полученное в ходе опыта №3; $I_{2A}^{(3)}$ – ток, протекающий по линейному проводу А, в конце исследуемого участка, значение которого получено в опыте №3.

$$Z_1 = \frac{7,283 \cdot e^{i0}}{0,018985 \cdot e^{-i83,757}} = 384,3271 \cdot e^{i83,757} = 41,7938 + i382,0479, \text{ Ом.}$$

Волновые сопротивления фазных проводов В и С определяются аналогично.

Расчет поперечных параметров

Для расчета поперечных параметров исследуемой модели ВЛ требуется для каждого линейного провода составить схему замещения, которая позволит определить искомые параметры. Для фазы А была составлена схема замещения, показанная на рис. 6.

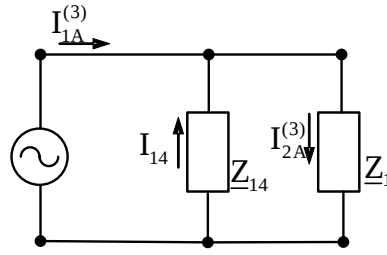


Рис. 6. Схема замещения для участка исследуемой модели ВЛ

На основании законов Кирхгофа составлены уравнения для определения I_{14} , и Z_{14} :

$$I_{14} = I_{2A}^{(3)} - I_{1A}^{(3)} = 0,0185 \cdot e^{-i82,1} - 0,0173 \cdot e^{-i81,1} = 0,0012399 \cdot e^{-i83,805} \text{ А.}$$

где $I_{2A}^{(3)}$ – ток в конце исследуемой ЛЭП в фазе А; $I_{1A}^{(3)}$ – ток в начале исследуемой ЛЭП в фазе А, значение которых получены в третьем опыте;

$$Z_{14} = \frac{U_{1A}^{(3)}}{I_{14}^{(3)}} = \frac{7,23 \cdot e^{i0}}{0,0012399 \cdot e^{-i83,805}} = 5831,15 \cdot e^{i83,8} = 69,25 + i5797,06 \text{ Ом.}$$

Идентично, на основании схемы замещения, показанной на рис. 5, определяются сопротивления между линейными проводами и заземленными конструктивными элементами $Z_{10} - Z_{15}$ и волновые сопротивления между линейными проводами в начале и в конце воздушной линии $Z_4 - Z_7$ [11].

Расчет емкости между линейным проводом А и заземленными элементами на основной частоте 50 Гц производится по формуле

$$C_A = \frac{1}{X_C \cdot \omega} = \frac{1}{5797,0635 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,5493 \cdot 10^{-6}, \text{ Ф}$$

где X_{C1} – емкостное сопротивление линейного провода А, $\omega = 2 \times \pi \times f$.

Расчет индуктивности линейного провода А производится по формуле

$$L_A = \frac{X_L}{\omega} = \frac{382,047}{2 \times 3,14 \times 50} = 1,216, \text{ Гн}$$

где X_L – индуктивное сопротивление линейного провода А.

Расчет волновых сопротивлений между линейными проводами А–В, А–С, емкостей и индуктивностей линейных проводов производится аналогичным образом.

Полученные значения продольных и поперечных параметров, исследуемой модели ЛЭП сведены в табл. 4.

Таблица 4

Продольные и поперечные параметры линейного провода А

Z_1 , Ом	ΨZ_1 , Град.	Z_4 , Ом	ΨZ_4 , Град.	Z_{14} , Ом	ΨZ_{14} , Град.
384,3271	83,757	375,2598	-17,23	3725,2	-89,51

На основании проведенных расчетов появляется возможность определить относительную погрешность емкости между фазой А и землей С14 исследуемой модели воздушной линии электропередачи:

$$\Delta_{CA} = \frac{0,58 - 0,5493}{0,58} \cdot 100 = 5,29, \%$$

а также относительную погрешность индуктивности линейного провода А:

$$\Delta_{LA} = \frac{1,216 - 1,2}{1,216} \cdot 100 = 1,3157, \%$$

На основании расчетов погрешности можно сделать выводы, что методика расчета имеет достаточно низкую погрешность вычислений, что позволяет с уверенностью утверждать о работоспособности представленной методики. Однако, для дальнейшего ее применения необходимо апробировать использованную методику на практике.

Численные значения продольных и поперечных параметров исследуемого восьмиполосника, полученные на основании предложенной методики, дают возможность достоверно установить количественную связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии, каковыми являются напряжения и токи в начале и конце исследуемого участка ЛЭП.

Заключение

Рассмотренный вариант экспериментального определения численных значений продольных и поперечных параметров восьмиполосника представляет собой один из путей дальнейшего развития теории многополосников. Он позволяет сделать объективный анализ электротехнического оборудования, в частности участка линии электропередачи.

Разработанные в данном исследовании элементы теории и методика экспериментального определения искомых параметров восьмиполосника могут быть образцом для формирования подобных методик для десятиполосников, двенадцатиполосников, четырнадцатиполосников, которыми могут быть замещены, например, двухпроводные линии электропередачи, трехфазные линии электропередачи трехпроводного и четырехпроводного исполнений, трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом, пятипроводного и шестипроводного (двухцепная ЛЭП) исполнений. Возможна разработка подобных элементов теории многополосников и методик расчета их параметров иных исполнений.

Теория многополосников, в частности теория восьмиполосников, может оказать существенную помощь в определении параметров ЛЭП разной протяженности, степени технической сложности и уровня напряжения и будет полезна специалистам, занимающимся областью расчета электрических режимов по ЛЭП.

Литература

1. Рыжов Ю. П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Изд-во МЭИ. 2007.
2. Булатников М.В. Определение начальных продольных параметров подземных и воздушных линий электропередачи на основе расчета электромагнитного поля // Электричество, №5, 2016. С. 17-24.
3. Бердин А.С., Коваленко П.Ю. Определение параметров схемы замещения двух смежных ЛЭП // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2014. № 2 (71). С. 29–34.
4. Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4 (33). С. 35–40.
5. Christoph Braun, Mahbubur Rahman, Valentina Cecchi. A transmission line model with non-uniformly distributed line impedance // 2017 North American Power Symposium (NAPS), 2017. pp.187–201.
6. Chongyang Mao, Xiaobing Zou, Xinxin Wang. Analytical Solution of Nonuniform Transmission Lines for Z-Pinch // IEEE Transactions on Plasma Science. Vol. 42, №8, Aug. 2014. pp. 2092–2097.
7. José A. Brandão Faria, Rodolfo Araneo. Computation, Properties, and Realizability of the Characteristic Immittance Matrices of Nonuniform Multiconductor Transmission Lines // IEEE Transactions on Power Delivery. V.33. N.4 .Aug. 2018. pp. 1885–1894.
8. Plotnikov M.P., Bolschanin G.A. Amplitude Values of the Incident and Reflected Waves in a Double-Circuit Power Transmission Line // IEEE Xplore 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). V.6. October 2018. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602612 - <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602612/authors#authors>.
9. Файбисович В. А. Определение параметров электрических систем: новые методы экспериментального определения, М., Энергоиздат, 1982. с. 120.
10. Bergeal J., Moller L. Analysis of the spectrum impedance of a network use of digital methods // Proc. Int. Conf. Electricity Distribution (CIRED). 1983.
11. Sana S., Aldeen M., Tan C. Fault detection in transmission network of power systems // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2011. № 33 (4). pp. 887-900
12. Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. 2016. № 5. С. 16-21

13. Большанин Г.А., Плотников М.П. Метод четырнадцатиполюсника для определения параметров однородного участка двухцепной линии электропередачи. Монография. Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2019. 176 с.

14. Большанин, Г.А, Большанина, Л.Ю. Способ определения первичных и обобщенных вторичных параметров однородного участка трехпроводной линии электропередачи методом восьмиполюсника Патент 2522829 Российской Федерации МПК G 01 R 27/02 №2013101260/28. 20.07.2014.

15. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Использование теории восьмиполюсника для анализа электропередачи // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken. 2014. 145 с.

16. Беляков Ю.С. Многополюсник как модель электрических систем. Ч.2. М: НТФ Энергопрогресс, 2013. 92 с.

17. Большанин Г.А. Передача электрической энергии пониженного качества по воздушным линиям электропередачи. Братск: Изд-во БрГУ, 2018. 223 с.

Авторы публикации

Большанин Георгий Анатольевич – канд. техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета.

Плотников Михаил Павлович – канд. техн. наук, доцент, кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета.

Шевченко Михаил Алексеевич – аспирант Братского государственного университета.

References

1. Ryzhov Yu P. *Long-range transmission of ultra-high voltage*. M.:MEI Publishing house. 2007.
2. Bulatnikov MV. The determination of initial longitudinal parameters of underground and overhead power lines based on calculation of electromagnetic field. *Electricity*. 2016;5:17-24.
3. Berdin AS., Kovalenko PYu. Determination of the parameters of the equivalent circuit of two adjacent power lines. *News of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System*. 2014;2 (71): 29–34.
4. Panova EA., Albrecht AYa. Refined specific electrical parameters of double-circuit 110 kV transmission lines for remote location of damage location. *Electrotechnical systems and complexes*. 2016;4 (33):35-40.
5. Christoph Braun, Mahbubur Rahman, Valentina Cecchi. *A transmission line model with non-uniformly distributed line impedance*. 2017 North American Power Symposium (NAPS), 2017. P.187–201.
6. Chongyang Mao, Xiaobing Zou, Xinxin Wang. Analytical Solution of Nonuniform Transmission Lines for Z-Pinch // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2014; 42(8):2092–2097.
7. José A. Brandão Faria, Rodolfo Araneo. Computation, Properties, and Realizability of the Characteristic Immittance Matrices of Nonuniform Multiconductor Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. pp. 1885–1894.
8. Plotnikov MP., Bolschanin GA. Amplitude Values of the Incident and Reflected Waves in a Double-Circuit Power Transmission Line. *IEEE Xplore 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2018. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602612 - <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602612/authors#authors>.
9. Faybisovich VA. *Determination of electrical systems parameters: New methods of experimental determination*. M. Energoizdat. 1982. pp. 120
10. Bergeal J., Moller L. *Analysis of the spectrum impedance of a network use of digital methods*. *Proc. Int. Conf. Electricity Distribution (CIRED)*. 1983.
11. Sana S., Aldeen M., Tan C. Fault detection in transmission network of power systems. *Int. Journal Electric Power Energy Systems* 2011;33(4):887-900.
12. Kulikov AL., Lukicheva IA. Determination of the place of damage to the power line by the instantaneous values of the oscillograms of emergency events. *Vestnik IGEU*. 2016; 5:16-21.
13. Bolshanin GA., Plotnikov MP. *The method of the fourteen-pole for determining the parameters of a homogeneous section of a two-chain transmission line*: Monograph. Novosibirsk: Ed. ANS "Sibak", 2019. 176 p.
14. Bolshanin, GA, Bol'shanina, LYu. *Method for determining the primary and generalized secondary parameters of a homogeneous section of a three-wire transmission line using the eight-terminal method*. The applicant and the patent holder are the Fraternal State University. Patent 2522829 of the Russian Federation IPC G 01 R 27/02. №2013101260. 20.07.2014.

15. Bolshanin GA., Bolsanina LYu. *Using the theory of an eight-terminal network for analysis of power transmission*. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2014. P.145.

16. Belyakov YuS. *Multipolar As a model of electrical systems*. Pt 2. M.: NTF Energoprogress, 2013- P. 92.

17. Bol'shanin GA. *Transmission of low quality electrical energy via overhead power lines*. Bratsk: Publishing House of the BrSU, 2018.P. 223.

Authors of the publication

Georgy A. Bolshanin – Bratsk State University, Bratsk, Russia.

Mikhail P. Plotnikov – Bratsk State University, Bratsk, Russia.

Mikhail Al. Shevchenko – Bratsk State University, Bratsk, Russia.

Поступила в редакцию

21 февраля 2019 г.



ТОПОЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Н.И. Смоленцев¹, Л.М. Четошникова²

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Новосибирск, Россия,

²Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Челябинск, Россия

ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5775-2903>, smolenzev@rambler.ru

Резюме: Цель работы – снижение потерь и повышение энергосбережения в электрических сетях. Задачи энергосбережения и энергоэффективности требуют не только снижения потерь на различных этапах передачи и преобразования электроэнергии, но и сохранения баланса энергии, генерируемой в электросистеме и потребляемой электроприемниками в различных режимах работы. С увеличением числа электроприемников и усложнением электроэнергетических систем произвести такое согласование в традиционных способах передачи электроэнергии достаточно сложно, что неизбежно приводит к потерям, снижению энергоэффективности таких систем. Для достижения данной цели предложена многоуровневая топология электрической сети и асинхронный способ передачи электрической энергии между узлами, включающими нагрузку, источники энергии, накопители энергии, присоединенные соответствующим образом. Математическим методом показано, что данная топология сети позволяет с помощью накопителей энергии, управляемых по определенному алгоритму, и телеинформационных технологий оптимизировать баланс электрической энергии в сети, добиваясь равенства выработанной и потребленной электроэнергии. Такая топология сети и способ передачи электрической энергии могут быть положены в основу цифровых технологий в энергетике (ЭНЕРНЕТ).

Ключевым элементом многоуровневой топологии и асинхронного метода передачи электрической энергии являются накопители энергии, управляющие энергетическими потоками в сети с помощью телеинформационных технологий. Данная топология сети и асинхронный способ передачи электрической энергии позволяют уменьшить дисбаланс выработанной и потребленной в сети энергии, что приводит к ряду положительных результатов.

Ключевые слова: локальная электрическая сеть, накопитель энергии, топология, ЭНЕРНЕТ.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», идентификационный номер проекта RFMEFI57818X0265 (соглашение от 27.11.2018 г. № 075-02-2018-209 (14.578.21.0265)). Заказчик – Министерство образования и науки Российской Федерации.

Для цитирования: Смоленцев Н.И., Четошникова Л.М. Топология электрической сети и способ передачи электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С.95-103.[doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-95-103](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-95-103).

ELECTRIC NETWORK TOPOLOGY AND METHOD OF TRANSMISSION OF ELECTRIC ENERGY

N.I. Smolentsev¹, L.M. Chetoshnikova²

¹ Siberian State University of Telecommunications and Informatics,

Novosibirsk, Russia,

²Branch of the South Ural State University (NRU) in Miass, Russia

ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5775-2903>, smolenzev@rambler.ru

Abstract: The purpose of the work is to reduce losses and increase energy saving in electric networks. To achieve this goal, a multilevel topology of the electrical network and an asynchronous method for transferring electrical energy between nodes including a load, energy sources, energy storage devices connected in an appropriate manner are proposed. It is shown by the mathematical method that this network topology allows using energy storage devices controlled appropriately and using tele-information technologies to optimize the balance of electric energy in the network, achieving equality of the generated and consumed electricity. Such a network topology and a method of transmitting electrical energy can be the basis of digital technologies in the energy sector (ENERNET).

Keywords: local electric network, energy storage, topology, ENERNET.

Acknowledgments: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the implementation of the Federal Targeted Program "Research and Development in Priority Directions for the Development of the Scientific and Technological Complex of Russian Federation for 2014–2020", the project identification number is RFMEFI57818X0265 (agreement of 11.27.2018 № 075-02-2018-209 (14.578.21.0265)). The customer is the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

For citation: Smolentsev NI, Chetoshnikova LM. Electric network topology and method of transmission of electric energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):95-103. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-95-103.

Введение

Развитие альтернативной энергетики ставит задачи разработки архитектуры и топологии электрической сети, получившей название ЭНЕРНЕТ [1]. Основу сети ЭНЕРНЕТ будут составлять локальные электрические сети, содержащие альтернативные источники энергии (ветрогенератор, солнечные панели и другие), накопители энергии, интеллектуальную систему управления (ИСУ), совмещенную физическую среду для передачи электрической энергии и цифровой информации. Данные локальные сети могут объединяться в сети следующего, более высокого уровня, а также могут подключаться к централизованной электроэнергетической сети, содержащей генерирующие мощности (ТЭЦ, ГЭС, АЭС). Цифровые «умные» датчики элементов системы сети должны контролировать как техническое состояние сети, так и обмен энергией в режиме реального времени между источниками энергии, накопителями энергии, потребителями [2].

Для практического применения данной концепции и разработки стандартов необходимо получить расчетные формулы, описывающие процесс переноса электрической энергии в локальной сети в зависимости от ее физических параметров, нагрузки сети, емкости накопителей и пространственной плотности источников альтернативной энергии и потребителей энергии. Все элементы системы должны быть стандартизованы, а локальная сеть открыта для установки новых элементов систем, изготовленных любым производителем при условии удовлетворения требованиям стандартов. Также как ИНТЕРНЕТ, ЭНЕРНЕТ должна удовлетворять принципу открытости.

Такой подход к электроэнергетическим сетям позволит уйти от передачи электроэнергии на большие расстояния и практически локально совместить источник энергии и потребителей электроэнергии. Это сократит потери электроэнергии, возникающие при ее транспортировке на большие расстояния. Применение накопителей энергии позволит снизить стоимость электроэнергии за счет разницы в тарифах при покупке электроэнергии в часы минимума нагрузок и ее продаже в часы максимума [3,4].

Другой эффект от внедрения такой сети, как показывает опыт ИНТЕРНЕТ, заключается в распределенной генерации, то есть в возможности включения в локальную сеть малых генерирующих мощностей на основе источников энергии альтернативной энергетики. Каждая локальная сеть будет частью сети следующего уровня, например,

территориального, объединяющего различные объекты территории. Территориальная может стать частью национальной электроэнергетической сети. Такая иерархия значительно повысит управляемость сети и позволит достичь максимального экономического эффекта.

Увеличение числа элементов сети, ее многоуровневая структура, потребует перехода на новые цифровые технологии для обеспечения процессов измерений и учета в режиме реального времени. Основные задачи измерительных систем будут заключаться в следующих функциях:

- оценка состояния оборудования;
- оптимизация (интеллектуальное управление) режимов сети;
- непрерывный мониторинг данных;
- прямой обмен информацией по системам телекоммуникаций с потребителями энергии;
- интеллектуальное управление на уровне клиента электрических сетей потребителями энергии;
- управление энергетическими потоками с помощью накопителей энергии.

Развитие архитектуры локальных электрических сетей потребует решения ряда проблем технологического порядка. Это создание экономических преобразователей альтернативной энергии (ветрогенераторы, солнечные батареи и т.п.), передача электроэнергии на постоянном токе при помощи сверхпроводников, силовая электроника на новых физических принципах, создание сверхпроводящих накопителей энергии на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) [5–7]. Все это, в свою очередь, поможет сократить ежемесячные расходы на электроэнергию, снизить выбросы продуктов сгорания углеводородов в атмосферу и резко сократить потребление электричества в часы пиковой нагрузки. Кроме того, интеллектуальная сеть ЭНЕРНЕТ даст возможность более эффективно использовать возобновляемые источники энергии (например, солнечные батареи) и теплоэлектроцентрали, а также сократит зависимость местных потребителей от резервных генерирующих мощностей.

Стратегия в области сетевых технологий должна включать строительство хорошо защищенной комплексной электрической инфраструктуры, позволяющей управлять всей сетью энергоснабжения – от генерирующих станций до домашних и корпоративных потребителей – как единой целостной системой. Благодаря встроенным интеллектуальным функциям, такая сеть сможет активно распознавать колебания спроса и предложения и оперативно реагировать на них, повышая безопасность и надежность доставки электроэнергии и оптимизируя текущие расходы.

Управление электрическим током похоже на управление информационными потоками, поэтому принципы работы сетей ЭНЕРНЕТ сходны с принципами ИНТЕРНЕТА. Разница в том, что электрические сети могут включать в свой состав гораздо больше сетевых узлов. Здесь необходимо применить опыт интеграции, обработки важной информации, и с его помощью оптимизировать потребление электроэнергии. Технология *SmartGrid*, основанная на протоколе *IP*, представляет собой лучшее решение для потребителей, которые становятся частью интеллектуальной сети и получают возможность управлять генерацией и потреблением энергии, оптимизировать эти процессы с помощью интеллектуальных счетчиков. Эта технология дает реальные преимущества каждому пользователю.

Зарубежные исследования показали [8–10], что подобные технологии могут сократить потребление электроэнергии до 10 процентов. Более того, экономия может достигнуть 15 процентов и более, если бытовая техника (посудомоечные машины, стиральные машины и т.п.) будет программироваться на включение в наиболее выгодные промежутки времени. Со временем сокращение потребления энергии в часы пиковой нагрузки поможет избежать ожидаемого на отечественном энергетическом рынке дефицита генерирующих мощностей. Более того, те, кто сегодня потребляет электроэнергию, могут стать ее поставщиками. До сих пор электричество генерировалось, как правило, на тепловых электростанциях, работающих на нефти и газе. После развертывания сети ЭНЕРНЕТ резервные генерирующие мощности будут, по крайней мере, частично, предоставляться самими потребителями. Расходы в сетях электропередач снизятся, что принесет существенную выгоду как производителям, так и потребителям электроэнергии.

На основании вышесказанного можно дать следующую характеристику интеллектуальной электроэнергетической сети [11]. Это полностью интегрированная, саморегулирующаяся и самовосстанавливающаяся электроэнергетическая система, имеющая сетевую топологию и включающая в себя все генерирующие источники,

магистральные и распределительные сети, все виды потребителей электрической энергии, управляемой единой сетью информационно-управляющих устройств в режиме реального времени.

Основой ЭНЕРНЕТа является синергия развития цифровых и энергетических технологий, а также достижения в области силовой электроники, в области сверхпроводниковых технологий, альтернативных источников энергии, а также в области обработки больших баз данных (*BigData*), в области электроники и нанoeлектроники, создания на этой базе интеллектуальных датчиков анализа и учета работы элементов и частей энергосистемы.

С развитием сетевой многоуровневой структуры электрических сетей неизбежно возрастут потери, связанные с передачей электрической энергии между ее уровнями. Поэтому возникает вопрос о выборе оптимальной топологии сети и способе передачи электрической энергии между ее элементами сети таким образом, чтобы снизить потери.

Рассмотрим традиционные способы передачи электрической энергии от источника энергии (ИЭ) к потребителю электрической энергии (ПЭ). Для передачи электрической энергии используются следующие основные элементы: электрогенераторы (ЭГ), распределительные устройства высшего и низшего напряжения (РУ ВН, РУ НН), линии электропередач воздушные или кабельные (ВЛ, КЛ), повышающие и понижающие трансформаторные подстанции (ТП) [12–14].

В этих способах электрическую энергию на высоком напряжении передают от источников энергии к трансформаторным подстанциям, а затем к распределительным сетям на низком напряжении. Распределительные сети подключают к узлам нагрузки, от которых электрическая энергия передается электроприемникам. С целью снижения токов короткого замыкания, повышения надежности электропитания, снижения потерь электрической энергии распределительные сети включают на параллельную работу, снабжают устройством автоматического включения резерва (АВР), устанавливают главную понижающую подстанцию (ГПП) в центре электрических нагрузок (ЦЭН).

Задачи энергосбережения и энергоэффективности требуют не только снижения потерь электрической энергии на различных этапах передачи и преобразования электроэнергии, но и сохранения баланса энергии, генерируемой в электросистеме и потребляемой электроприемниками в различных режимах работы. С увеличением числа электроприемников и усложнением электроэнергетических систем произвести такое согласование в традиционных способах достаточно сложно, что неизбежно приводит к потерям энергии, снижению энергоэффективности таких систем.

Характерной особенностью существующих способов передачи электрической энергии является одновременность или синхронность процессов генерации, распределения и потребления электрической энергии. Такие способы передачи энергии могут быть названы синхронными. Это связано с электромагнитным характером процессов, происходящих в электрических генераторах, линиях электропередачи и электроустановках потребителей.

С увеличением числа электроприемников возрастает количество электростанций, усложняется распределительная сеть, усложняются требования к управлению работой электроэнергетических систем. Электростанции должны вырабатывать столько электрической энергии, сколько требуется электроприемникам в текущий момент времени. Эту задачу решают диспетчерские службы энергосистемы путем планирования графика нагрузок на предстоящий период и регулирования объема вырабатываемой мощности на электрических станциях. Планирование осуществляется по результатам статистического анализа графиков нагрузок за предшествующие периоды времени. При этом ставится задача достижения следующих целей в работе энергосистемы:

- выполнение плана выработки и распределения электрической энергии с покрытием максимумов нагрузки;
- бесперебойная работа электрооборудования и систем энергоснабжения;
- обеспечение необходимого качества отпускаемой потребителям электроэнергии по напряжению и частоте.

Несмотря на комплектование диспетчерских пунктов управления работой энергосистем средствами контроля, управления, связью, четкой мнемонической схемой расположения электростанций ЛЭП и подстанций, достичь баланса вырабатываемой и потребляемой при синхронном способе передачи энергии невозможно. Причины следующие:

- невозможно учесть реальную нагрузку в текущий момент из-за большого количества электроприемников и отсутствия информации их состояния в любой текущий

момент времени, следовательно, невозможно определить объем необходимой электроэнергии в текущий момент времени;

- данная конфигурация электрических сетей не соответствует принципу распределенной генерации и принципу приближения источников электроэнергии к потребителю;

- большие потери электроэнергии на трансформаторных подстанциях на различных уровнях напряжения;

- технически сложно согласовать работу электросистем с локальными электрическими сетями, использующими альтернативные источники энергии.

Все это приводит к неизбежным потерям электрической энергии из-за нарушения баланса выработанной электроэнергии при уменьшении электропотребления или к дефициту электрической энергии при возрастании электропотребления. К тому же возникают дополнительные затраты, поскольку отношение себестоимости энергии в базовой и пиковой части графика нагрузок достигает более 400 [15].

С целью повышения надежности и снижения потерь, в работе [12] предложен способ передачи электрической энергии, согласно которому, электрическую энергию передают через линии электропередачи и по кабелям распределительных сетей к узлам нагрузки, причем каждый узел нагрузки имеет питающую электрическую линию, резервную электрическую линию, транзитную электрическую линию. Узлы нагрузки соединены между собой и образуют в пространстве вершины шестиугольника, расположенного на обслуживаемой территории. Электроприемники присоединены к узлам нагрузки с минимальным приближением к источникам энергии, что соответствует принципу адаптивно-распределенных сетей. Данная электрическая сеть выполняется многоуровневой:

- в сети первого уровня располагают узлы нагрузки, представляющие распределительные пункты на напряжение 10–20 кВ;

- в сети второго уровня – распределительные пункты на напряжение 110–220 кВ;

- сети третьего уровня напряжения и выше – распределительные пункты на 220 кВ и выше.

Хотя по своей сути данный способ передачи электрической энергии остается синхронным, поскольку процессы генерации, распределения и потребления происходят одновременно, данная топология электрической сети позволяет повысить надежность и снизить потери.

Существенным недостатком рассмотренного способа передачи энергии является дисбаланс объема выработанной и потребленной энергии при случайных непредсказуемых изменениях нагрузки электроприемников электрической энергии, невозможность достижения баланса энергии.

Задачи энергосбережения и энергоэффективности требуют не только снижения потерь электрической энергии на различных этапах передачи и преобразования электроэнергии, но и сохранения баланса энергии, генерируемой в электросистеме и потребляемой электроприемниками в различных режимах работы.

Методы

Предметом исследования является локальная электрическая сеть, имеющая многоуровневую топологию в форме связанных многоугольников, равномерно распределенную по обслуживаемой территории и предназначенной для применения в цифровой энергетике ЭНЕРНЕТ. Целью исследований является определение условий баланса электрической энергии в сети с данной топологией. Поставленная цель решается теоретическим методом путем анализа энергобаланса в модели электрической сети, имеющей топологию шестиугольников в вершинах которых расположены узлы нагрузки, питающие линии, резервные линии и накопительные линии.

Результаты

С целью снижения дисбаланса между объемами выработанной и потребленной энергии рассмотрим способ, позволяющий достичь нового технического результата в предложенной топологии сети. Таким техническим результатом является повышение энергоэффективности и энергосбережения при передаче электрической энергии от ее источников к потребителю, повышение надежности электроснабжения.

Указанный технический результат достигается тем, что в предлагаемом способе передачи электрической энергии узлы нагрузки, расположенные в вершинах шестиугольников, образующих равномерно распределенную по обслуживаемой территории многоуровневую электрическую сеть, кроме питающих, транзитных, резервных электрических линий имеют дополнительно накопительную электрическую линию. Накопительная линия соединяет каждый из узлов нагрузок шестиугольника с накопителем

энергии, регулирующим энергетические потоки через узлы шестиугольника, что обеспечивает постоянный баланс между вырабатываемой и потребляемой электроэнергией в шестиугольниках и, соответственно, во всей многоуровневой электрической сети. Способ поясняется схемой, показанной на рисунках.

На рис. 1 изображен общий вид распределенной электрической сети, на рис. 2 – часть распределенной электрической сети.

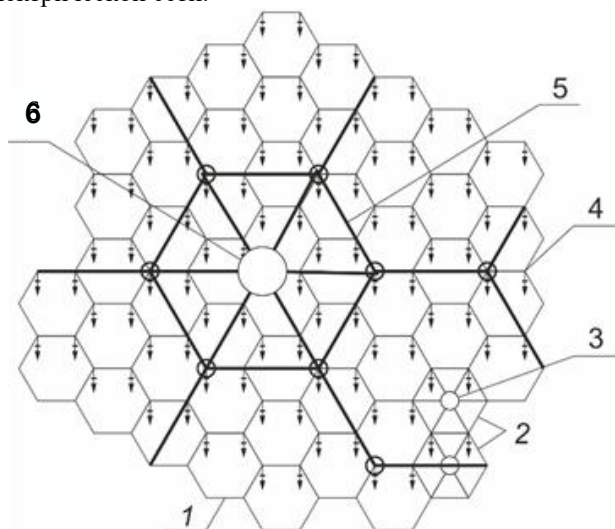


Рис. 1. Общий вид распределенной электрической сети: 1 – распределительная сеть; 2 – связанные шестиугольники; 3 – накопители энергии первого уровня; 4 – узлы нагрузки; 5 – связанные многоугольники второго уровня; 6 – накопители энергии второго уровня

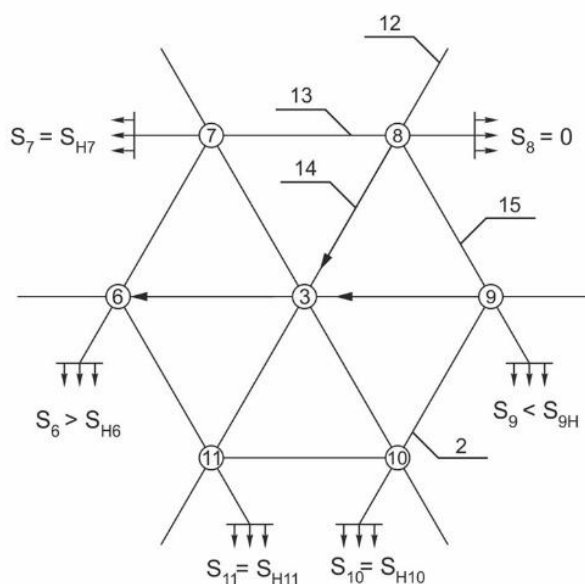


Рис. 2. Часть распределительной сети: 6–11 – узлы нагрузки; 12 – питающая линия; 13 – накопительная линия; 14 – резервная линия

Так на рис. 1 распределительная сеть 1 имеет двухуровневую конфигурацию связанных шестиугольников 2, в вершинах которых располагаются узлы нагрузки 4, соединенные с накопителями энергии первого уровня 3; связанные многоугольники второго уровня 5 соединены с накопителем 6 второго уровня. Остальные шестиугольники первого и второго уровня имеют аналогичные соединения (на рис. 1 не указаны).

На рис. 2 к узлам нагрузок 6–11 подсоединены электроприемники с потребляемой мощностью S_6 – S_{11} и номинальной мощностью S_{H6} – S_{H11} соответственно. Каждый из узлов нагрузки 6–11 содержит питающую 12, транзитную 13, накопительную 14 и резервную 15 линии.

Распределительная сеть является инвариантной. Питающая линия может стать, при необходимости, транзитной или резервной, транзитная – питающей, резервная – транзитной.

Также, на рис. 2 в центре шестиугольника расположен накопитель энергии 3, который соединен с каждым из узлов нагрузки 6–11 при помощи накопительных линий 14.

Способ осуществляют следующим образом. Электрическую энергию передают через линию электропередачи и по кабелям распределительных сетей к узлам нагрузки 6–11 (см. рис. 2) в текущий момент времени. Узлы нагрузки 6–11 находятся под напряжением и являются источниками энергии для электроприемников с мощностями S_6 – S_{11} .

Предположим, например, что для данного текущего момента времени потребляемые мощности S_6 – S_{11} в узлах нагрузки 6–11 шестиугольника 2 равны номинальной мощности S_{H6} – S_{H11} и удовлетворяет следующим условиям:

$$S_6 > S_{H6}; S_7 = S_{H7}; S_8 = 0; S_9 < S_{H9}; S_{10} = S_{H10}; S_{11} = S_{H11}.$$

Таким образом, в шестиугольнике 2 образовался избыток мощности, равный $S_8 + (S_{H9} - S_9)$, который поступает (на рис. 2 показано стрелками) в накопитель энергии 3. Накопитель энергии 3 аккумулирует избыточную энергию и распределяет ее затем в узел нагрузки, который испытывает дефицит энергии. В нашем случае энергия распределяется к узлу нагрузки 6, т.к. потребляемая мощность S_6 превышает номинальную мощность S_{H6} (в соответствии с условием $S_6 > S_{H6}$). Направление передаваемой энергии из накопителя энергии 3 в узел нагрузки 6 показано стрелкой.

На других уровнях напряжения распределительной электрической сети происходит аналогичное накопление и перераспределение электрической мощности. Избыточная энергия, возникающая в распределительной сети, в один отрезок времени сохраняется в накопителе энергии, а в другой, при необходимости, отдается электроприемникам, где потребляемая мощность возросла.

Таким образом, в этом способе передачи электрической энергии возникает временной интервал, равный циклу «заряд-разряд» накопителя энергии, в течение которого нарушается принцип одновременности циклов генерации, распределения и потребления электрической энергии, характерный для способов, отнесенных выше к синхронным.

Такой способ передачи электрической энергии может быть назван асинхронным. Асинхронный способ передачи электрической энергии позволяет достичь баланса между вырабатываемой и потребляемой электроэнергией. Реализация предлагаемого способа передачи энергии позволит:

- снизить потери энергии, возникающие при дисбалансе вырабатываемой и потребляемой энергии;
- увеличить надежность электроснабжения электроприемников за счет дополнительной накопительной электрической линии;
- уменьшить затраты на электроэнергию путем уменьшения отношения себестоимости энергии в базовой и пиковой части графика нагрузок;
- увеличить срок службы электрооборудования.

Обсуждение

Многоуровневая топология электрической распределительной сети в виде связанных многоугольников, в вершинах которой размещены узлы нагрузки, а также питающая, резервная и накопительная линии, соединяющие накопитель энергии с узлами нагрузок, позволяет, путем управления энергетическими потоками с помощью накопителей энергии на всех уровнях сети, уменьшить дисбаланс выработанной и потребленной в сети энергии. Это приводит к ряду положительных результатов. Для обеспечения управления энергетическими потоками необходима телеинформационная сеть, которая обеспечивает получение информации о состоянии генерации, потребления и состоянии накопителей энергии. Для получения информации потребуется большое количество дешевых датчиков и средства коммуникации. Эта задача решается с помощью возможностей сети ИНТЕРНЕТ. Хранение и обработка большого количества данных решается с помощью «облачных технологий» и технологий искусственного интеллекта (*BigData*).

Заключение

В работе рассмотрена многоуровневая топология электрической распределительной сети в виде связанных многоугольников и асинхронный способ передачи электрической энергии между узлами, содержащими нагрузку, источники энергии, накопители энергии, соединенные и управляемые на всех уровнях сети соответствующим образом. Такая топология электрической сети может быть положена в основу цифровых технологий в энергетике (ЭНЕРНЕТ). Данная топология сети позволяет уменьшить дисбаланс выработанной и потребленной в сети энергии, что приводит к ряду положительных результатов.

Литература

1. Старченко А.Г., Дзюбенко В.В., Ряпин И.Ю. Интернет энергии: Будущее электроэнергетики уже наступило // Цифровая энергетика. 2018. №5. С.17–24.
2. Белов В.Ф., Рожкова С.А., Фарафонов Д.В. Экспериментальная оценка модели оптимального управления накопителем электрической энергии // Modern HIGH Technologies. 2016. №5. С.20–26.
3. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SmartGrid. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208с.
4. Смоленцев Н.И., Кондрин С.А. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии для локальных электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т.19. №3-4. С. 53–60.
5. Experimental Setup and Efficiency Evaluation of Zero-Field-Cooled (ZFCYBCO Magnetic Bearings // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017.V. 27.N. 4.
6. Lin X., Lei Y., Zhu Y.A. Novel Super conducting magnetic Energy Storage system design based on a Three-Level T-type Converter and ITS Energy-Shaping Control Strategy. Electric Power Systems Research. 2018.V. 162. pp. 64-73.
7. Smolentsev N.I., Kondrin S.A., Bondarev Y.L., Gilmetdinov M.F., et al. Some Issues of development and mathematical Modeling of superconducting electrokinetic Energy Storage Unit. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Ser. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies" 2017.
8. Bayat H. Energy management system for smart house with multi-sources using pi-ca controller. Afrakhte P. 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, ICREDG 2016. V.4. pp. 24-31.
9. Sun Q., Zhang Y., Ma Zhang A. Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet, H.D. 2017. IEEE Transactions on Smart Grid. 2017.V.8. N.3. pp.1195-1210
10. Rastegar M., Fotuhi-Firuzabad M., Moeini-Aghataie M., et al. Probabilistic Energy Management Scheme for Renewable-Based Residential Energy Hubs // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. V. 8. N.5. pp. 2217-2227.
11. Smart Power Grids – Talking about a Revolution // IEEE Emerging Technology Portal, 2009 .
12. Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А. «Способ передачи электрической энергии» Патент на изобретение РФ № 2475918, МПК H02J4/00; RU. Оpubл. 20.02.2013, Бюл. № 5.
13. Чивенков А.И., Крахмалин И.Г. «Способ передачи электрической энергии трехфазного напряжения на переменном токе и система для его реализации». Патент на изобретение РФ № 2337451, МПК H02J3/00, опубл. 27.10.2008; RU. Бюл. №30.
14. Бекерманн Йенс, Хайнбокель Штефан. «Устройство и способ для формирования, накопления и передачи электрической энергии». Патент на изобретение РФ № 2496208, МПК H02J7/34, опубл. 20.10.2013 г. RU. Бюл. № 29.
15. Рауль Е.В. Перспективы применения накопителей энергии для сетей электроснабжения 0,4 кВ // Вестник МЭИ. 2013. № 3.

Авторы публикации

Смоленцев Николай Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры технической электроники Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. E-mail: smolentzev@rambler.ru.

Четошников Лариса Михайловна – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматики филиала ЮУрГУ (НИУ). E-mail: chlms56@mail.ru.

References

1. Farafontov DV. Experimental evaluation of the model of optimal control of an electric energy. Internet Energy: The Future of the Electricity Industry Has Come. *DigitalEnergy*. 2018;5:17-24.
2. Belov VF., Rozhkova storage. *Modern HIGH Technologies*. 2016;5:20–26.
3. Kobets BB., Volkova IO. *Innovative development of the electric power industry based on the SmartGrid concept*. M. IAC Energy, 2010.
4. Smolentsev NI., Kondrin SA. Superconducting electrokinetic energy storage for local electric networks. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2017;19(3-4):53-60.
5. AJ. Arsenio Experimental Setup and Efficiency of Zero-Field-Cooled ZFCYBCO Magnetic Bearings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017;27(4):3601105.
6. Lin X., Lei Y., Zhu Y A Novel Super conducting magnetic Energy Storage system design based

on a Three-Level T-type Converter and ITS Energy-Shaping Control Strategy. *Electric Power Systems Research*. 2018;162:64-73.

7. Smolentsev NI., Kondrin SA., Bondarev YL., Gilmetdinov MF., Kazantsev AM., Sirekanyan VV. Some Issues of development and mathematical Modeling of superconducting electrokinetic. Energy Storage Unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Ser. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering Power Supply of Mining Companies"* 2017.

8. Bayat H. Energy management system for smart house with multi-sources using pi-ca controller. *Afrakhte 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation CREDG* 2016;4:24-31.

9. Sun Q., Zhang Y., Ma. Zhang, H.D. A Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017;8(3):1195-1210.

10. Fotuhi-Firuzabad M., Moeini-Aghaie M., Zareipour HA. Probabilistic Energy Management *Grid* 2017;8(5):2217-2227.

11. Smart Power Grids - Talking about a Revolution. *IEEE Emerging Technology Portal*, 2009.

12. Loskutov AB., Sosnina EN., Loskutov AA. "Method for the transmission of electrical energy", Patent for the invention of the Russian Federation N. 2475918, IPC H02J4/00 RU. Publ. 02.20.2013, Bull. N. 5.

13. Chivenkov AI., Krakhmalin IG. "A method for transmitting electrical energy of three-phase AC voltage and a system for its implementation". Patent for the invention of the Russian Federation N. 2337451, IPC H02J3/00, publ. 10/27/2008; RU. Bull. N. 30.

14. Beckermann Jens, Heinbockel Stefan. "Device and method for the formation, storage and transmission of electrical energy". Patent for the invention of the Russian Federation N. 2496208, IPC H02J7/34, publ. 10.20.2013, RU. Bull. N. 29.

15. Raul EV. Prospects for the use of energy storage for 0.4 kV power supply networks. *Vestnik MPEI*. 2013.

Authors of the publication

Nikolai I. Smolentsev - Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russia. smolentsev@rambler.ru

Larisa M. Chetoshnikov - Branch of the South Ural State University (NRU) in Miass, Russia. smolentsev@rambler.ru.

Поступила в редакцию

27 августа 2019 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 621.3.056.

DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-4-104-112

ДИАГНОСТИКА ГОЛОЛЕДА НА ГРОЗОЗАЩИТНЫХ ТРОСАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Г.В. Вагапов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vagapov@list.ru

Резюме: Цель исследования заключается в выборе эффективной технологии мониторинга состояния грозозащитных тросов в пролете на основе применения программно-аппаратного комплекса обеспечения анализа технического состояния грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше, позволяющих выполнить комплексную оценку воздействия как внешних климатических факторов от ветровой и гололедной нагрузок, так и величины теплового удлинения грозозащитных тросов от воздействия протекающего тока в режиме плавки гололеда. Методы исследования заключаются в проведении анализа текущего состояния грозозащитных тросов и их предельных значений механической прочности, позволяющих произвести оценку эффективности мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций. Результатами исследования выступает возможность визуализации текущих параметров грозозащитных тросов в пролете воздушной линии электропередачи, что в свою очередь сокращает время принятия решений по предотвращению аварийных режимов работы линий. В качестве вывода исследования выступает алгоритм мониторинга состояния грозозащитных тросов, основанный на информации о текущих значениях продольного и поперечного углов, а также значениях окружающей температуры и температуры грозозащитного троса получаемой с сенсоров, смонтированных непосредственно на тросах.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, гололедно-изморозевые отложения, мониторинг, стрела провеса, уравнение состояния грозозащитного троса.

Для цитирования: Вагапов Г.В. Диагностика гололеда на грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С. 104-112. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-104-112.

DIAGNOSTICS OF THE ICE ON THE STRIKE PROTECTION WIRE

GV. Vagapov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vagapov@list.ru

Abstract: The relevance of the research problem is chose of effective technology of strike protection wire monitoring in span with use of technical system of analysis of technical condition of strike protection wire of 110 kV voltage power line for complex assessment of the impact of both external climatic factors from wind and ice loads and the magnitude of the thermal elongation of the strike protection wire with influence of current during de-icing process. Analysis of the strike protection wire mode and their limiting values of mechanical strength allow evaluation of the effectiveness of events of prevent of accidents and reduce the undersupply of electricity to the end consumers. Visualization of the operative parameters of the strike protection wire in the span of the overhead power line will allow reduce the time to make decisions on the prevention of accidents of lines. Algorithm of monitoring of operative parameters of wires of overhead power lines base on information of longitudinal and transverse angles received from sensors installed directly on the strike protection wire.

Keywords: overhead power line, ice load, monitoring, sag, main equation of strike protection wire.

For citation: Vagapov GV. Diagnostics of the ice on the strike protection wire. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):104-112. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-104-112.

Введение

Актуальность исследования

Одной из основных тенденций развития единой общероссийской электрической сети является направление на устранение технологических ограничений перетока электрической энергии и развития пропускной способности электрических сетей, что нашло отражение в работах [2, 4]. В качестве природных факторов, ограничивающих передачу электроэнергии и мощности по электрическим сетям, выступают ветровые и особенно гололедно-изморозевые природные воздействия на провода и грозозащитные тросы (ГЗТ) воздушных линий (ВЛ) электропередачи. Гололедно-изморозевые отложения (ГО), как правило, приводят к существенным механическим перегрузкам ГЗТ и, как следствие, к их обрывам. Обрывы на ВЛ, в свою очередь, накладывают существенные ограничения на отпуск электроэнергии конечному потребителю, что подтверждается особым вниманием к ежегодным мероприятиям по подготовке к осенне-зимнему периоду со стороны Министерства энергетики Российской Федерации и нормативной документацией. ГЗТ ВЛ напряжением 110 кВ и выше подвержены в наибольшей степени негативному влиянию ГО из-за их существенной протяженности и ежегодного прироста количества плавок гололеда. Таким образом, ГО оказывают существенное влияние на функционирование электросетевого комплекса, в особенности на ГЗТ ВЛ, ввиду их преимущественно меньшего сечения по сравнению с фазными проводами.

Проведенные исследования по раннему выявлению и снижению негативного воздействия ГО выявили наличие существенного количества теоретических направлений исследований как в отечественной [1, 2, 4], так и в зарубежной литературе [3, 5, 6]. Имеет место быть существенное разнообразие установленных технических систем в электрических сетях. Однако, несмотря на большое количество публикаций и внедренных противогололедных систем, в электрических сетях всех классов напряжений, например [7, 8, 9], проблема ГО не теряет своей актуальности, что подтверждается работами [10, 11].

Теоретическое обоснование

Классическая методика определения состояния ГЗТ в пролете при воздействии ГО базируется на определении значений механического напряжения и стрелы провеса. Данные параметры определяются для предельных случаев: при наибольших значениях нагрузки; при низших значениях температур для исключения превышения значения напряжения больше допустимого. Целью мониторинга состояния ГЗТ предполагает выявление воздействия на ГЗТ внешних возмущений еще на ранней стадии их появления. Для мониторинга ГО на ГЗТ в данном исследовании предложено использовать сенсоры, отслеживающие как угол продольного провеса ГЗТ, так и угол его поперечного отклонения (рис. 1). Методика оценки воздействия ледяных отложений основывается на измеряемых геометрических параметрах с учетом конкретного места крепления сенсора в пролете и с учетом вытяжки ГЗТ за время его эксплуатации.

Определение состояния ГЗТ в пролете основывается на каноническом уравнении цепной линии [12],

$$y = a \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x}{a} - 1 \right), \quad (1)$$

где a – параметр канонического уравнения цепной линии.

Общее уравнение состояния ГЗТ в пролете описывается классическим уравнением [12]:

$$L_n = L_m \cdot \left[1 + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_n - \sigma_m) \right] \cdot [1 + \lambda \cdot (t_n - t_m)] \quad (2)$$

где E – модуль упругости; L_n – длина ГЗТ в пролете в конечном состоянии; L_m – длина ГЗТ в пролете в начальном состоянии; σ_n – напряжение в ГЗТ в точке подвеса в конечном состоянии; σ_m – напряжение в ГЗТ в точке подвеса в начальном состоянии; λ –

коэффициент температурного линейного расширения; t_n – температура ГЗТ в конечном состоянии; t_m – температура ГЗТ в начальном состоянии.

Уравнения (1) и (2) образуют общую систему уравнений определения текущего состояния ГЗТ. Аналогичный подход представлен в работе [13].

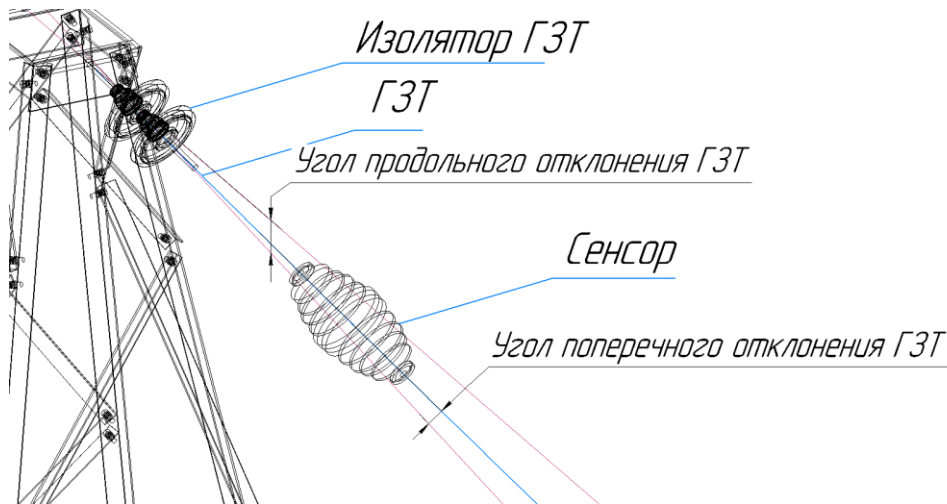


Рис. 1. Сенсор на ГЗТ

Рис. 2 иллюстрирует общий случай подвеса ГЗТ в пролете, при котором точки подвеса ГЗТ являются разновысокими, ось ординат проходит через нижнюю точку провеса ГЗТ.

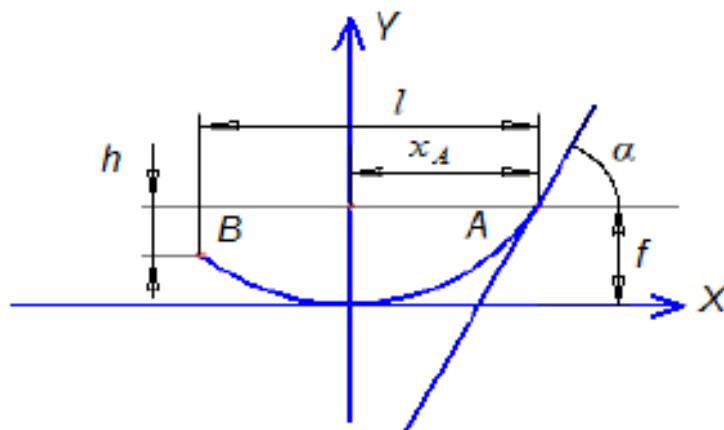


Рис. 2. Стрела провеса ГЗТ: A и B – координаты разновысоких точек подвеса ГЗТ на опорах; x_A – расстояние между координатой точки A и осью ординат; f – стрела провеса ГЗТ; l – расстояние между опорами в пролете; α – угол наклона касательной в точке подвеса ГЗТ; h – расстояние по вертикали точек подвеса ГЗТ

Согласно работе [2], тангенс угла наклона касательной α в точке подвеса ГЗТ раскрывает зависимость от параметра a следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{sh} \frac{x_a}{a}. \quad (3)$$

Как показали результаты натурных экспериментов [2], значение угла α должно определяться с точностью до сотых значений градуса при длине пролета ВЛ более ста метров для снижения погрешностей определения стрелы провеса f ГЗТ, которая определяется по известной формуле [2]:

$$f = a \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_a}{a} - 1 \right). \quad (4)$$

Согласно [2] параметр h на рис. 1 имеет следующую зависимость от значений a и x_a :

$$h = a \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_a}{a} - \operatorname{ch} \frac{l - x_a}{a} \right). \quad (5)$$

Объединение уравнений (3) и (5) в общую систему уравнений предоставляет возможность однозначного определения значений a и x_a . В данной системе уравнений значение угла α наклона касательной в точке подвеса ГЗТ определяется по данным с сенсора, значения h и l определяются из проектных данных на ВЛ или по результатам натурного обследования.

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{sh} \frac{x_a}{a} \\ h = a \left(\operatorname{ch} \frac{x_a}{a} - \operatorname{ch} \frac{l - x_a}{a} \right) \end{cases} \quad (6)$$

Система уравнений (6) является нелинейной. Для ее решения предлагается использование любого математического программного продукта. Ниже описывается реализация этой функции в системе мониторинга гололеда ГЗТ. В результате решения системы уравнений (5) появляются однозначные значения параметров a и x_a . Полученные значения предоставляют возможность точного математического определения геометрической длины ГЗТ L в пролете по уравнению

$$L = a \cdot \left(\operatorname{sh} \frac{x_a}{a} + \operatorname{sh} \frac{l - x_a}{a} \right) \quad (7)$$

и стрелы провеса ГЗТ – по формуле (4).

Значение геометрической длины ГЗТ в пролете предоставляет возможность перехода к уравнению состояния ГЗТ непосредственно к определению действующих условий работы ГЗТ через начальное и конечное значение геометрической длины ГЗТ в пролете. Данный переход от геометрических параметров к физическим вызван необходимостью определения степени воздействия таких внешних климатических параметров, как ветер и ГО. Необходимо также отметить, что при переходе от геометрического описания длины ГЗТ к физическому через уравнение состояния ГЗТ появляется в явном виде возможность численного описания различных видов удлинений ГЗТ, в том числе температурных и гуконских удлинений.

Основная суть перехода от определяемой геометрической длины к классическому уравнению длины ГЗТ через начальное и конечное состояния состоит в определении σ_n напряжения в ГЗТ в точке подвеса ГЗТ в конечном состоянии. Искомое напряжение позволяет осуществить переход непосредственно к определению нагрузок, воздействующих на ГЗТ.

Переход от геометрических параметров к физическим осуществляется посредством объединения уравнений (2) и (7) на основе значения длины ГЗТ в пролете.

Подобный же подход от геометрических параметров к физическим представлен и в других исследованиях [1, 12]. В большинстве как отечественных, так и зарубежных работ [6–11] уравнение (8) позволяет определять граничные условия работы ГЗТ в пролете. В подавляющем большинстве случаев данное уравнение состояния используется на этапе проектирования ВЛ и не учитывает вытяжки ГЗТ на этапе эксплуатации. Однако необходимость учета вытяжки указывается в [14].

С учетом вытяжки ГЗТ в уравнение (8) введен новый множитель, который учитывает этот фактор. Итоговое уравнение с учетом нового фактора принимает вид

$$L_n = L_m \cdot \left[1 + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_n - \sigma_m) \right] \cdot [1 + \lambda \cdot (t_n - t_m)] \cdot [1 + \sigma_T \cdot T], \quad (8)$$

где T – количество полных лет с момента монтажа грозозащитного троса в пролете; λ – коэффициент температурного удлинения ГЗТ; E – модуль упругости; σ_T – величина вытяжки грозозащитного троса за год.

Величина σ_T может быть определена по статистическим данным либо определена расчетным путем с использованием специализированного программного обеспечения.

Поскольку в качестве исходного принят базовый режим, когда σ_m определяется механической нагрузкой только от собственного веса ГЗТ, то увеличение значения σ_n относительно σ_m означает появление дополнительной механической нагрузки на проводе.

При отсутствии ветра это будет именно гололед при изменении температуры не более десяти градусов между режимами n и m .

Наличие ветра не меняет принципиально предложенную методику распознавания ГО на проводе. Учет воздействия ветра выполняется за счет отслеживания угла отклонения ГЗТ от вертикали ϕ_{Π} (рис. 3).

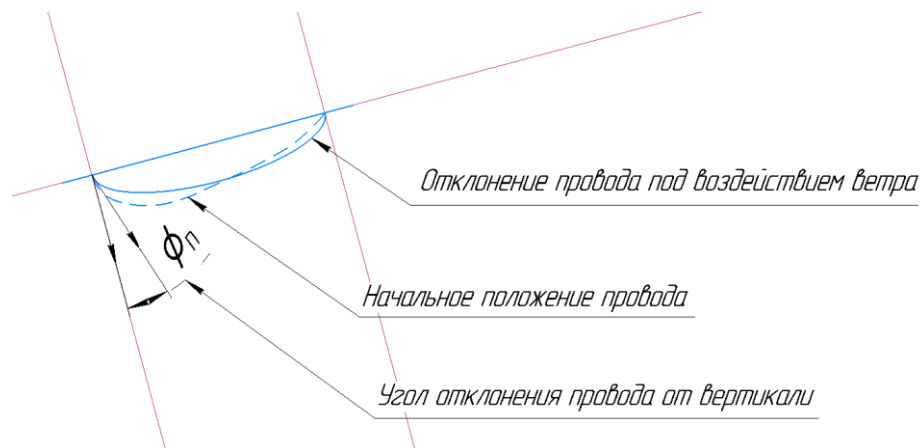


Рис. 3. Визуализация отклонения ГЗТ от воздействия ветра на угол ϕ

Диагностическая суть определения значения поперечного угла ГЗТ заключается в выделении весовых и ветровых нагрузок при воздействии бокового ветра ГЗТ. Подобный подход необходим для разделения суммарной нагрузки на все ее составляющие, в том числе и выделение наиболее важной – составляющей от воздействия гололедной нагрузки. Следует учесть, что значения стрел провеса f_n и f_m рассчитываются на основе решения уравнений (6), в которых при наличии ветра угол α уже не тот, который измеряется сенсором, где чувствительный элемент основан на гравитационном принципе.

Практическая реализация системы мониторинга

На электротехническом рынке существует целый ряд компаний, производящих те или иные модификации сенсоров, что предоставляет широкий выбор первичного оборудования. Предложенные теоретические положения были опробованы в системе мониторинга на ГЗТ действующей ВЛ напряжением 110 кВ (рис. 4). В качестве первичного оборудования были выбраны первичные сенсоры наклона, подробно описанные в работе [2]. Сенсоры используемого типа предоставляют информацию о текущем значении поперечного и продольного углов провеса провода (рис. 4).

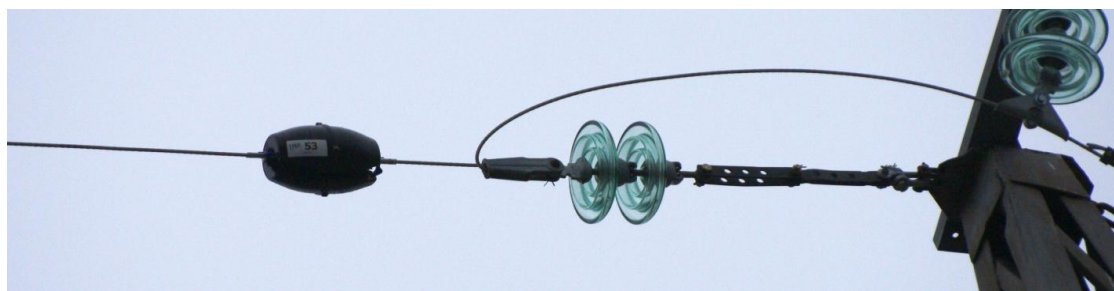


Рис. 4. Сенсор провеса ГЗТ

Значения угла провеса ГЗТ с сенсора определяются каждые 20 минут в нормальном режиме с возможностью переключения на интервал 10 секунд в период ГО. На рис. 5 в качестве примера приведены данные угла провеса и температуры ГЗТ в ОЗП 2017–2018 года в период отсутствия гололедаобразования на ВЛ. На рис. 6 приведены данные изменений продольного угла ГЗТ в ОЗП 2017–2018 года. Имеется однозначная корреляционная зависимость между продольным углом наклона ГЗТ и температурой окружающей среды.

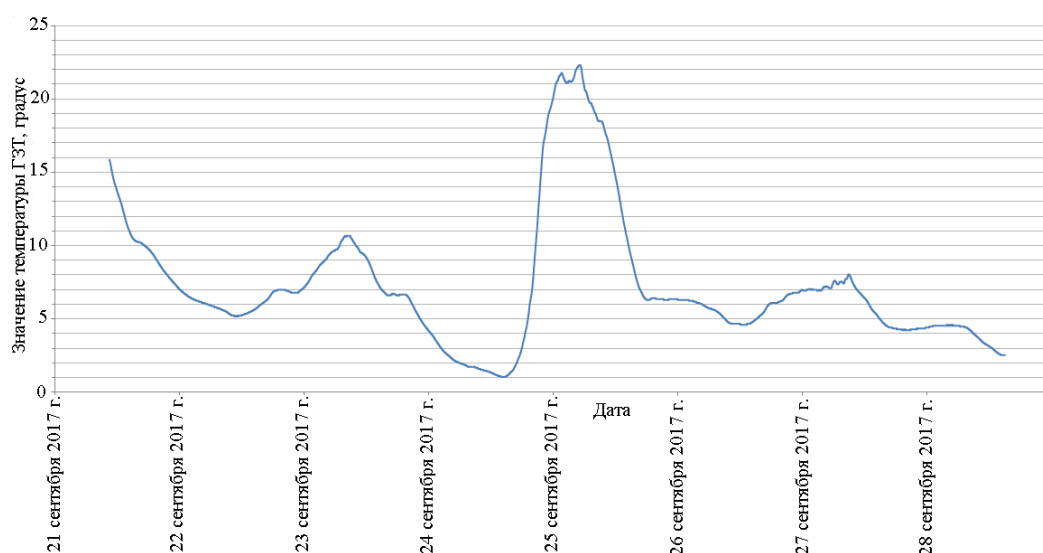


Рис. 5. Масштабированная динамика изменения температуры ГЗТ за период 22.09.2017–25.09.2017

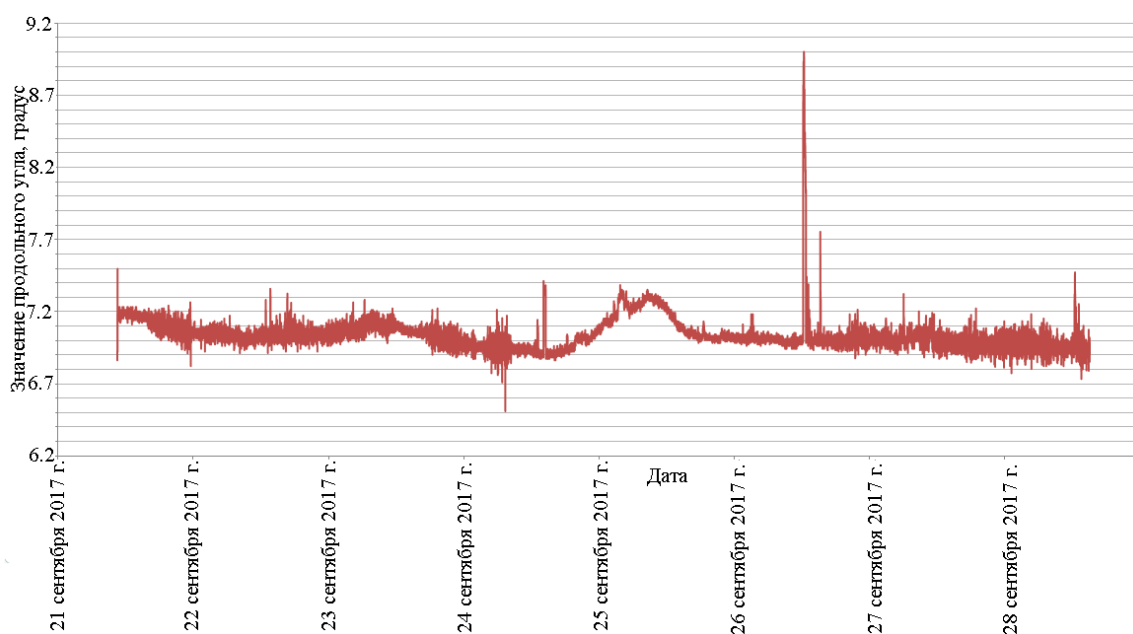


Рис. 6. Масштабированная динамика изменений продольного угла ГЗТ за период 22.09.2017–25.09.2017

Изменение температуры ГЗТ приводит к изменению длины троса в пролете, что сказывается на углах провеса ГЗТ. Таким образом, на основании предложенного алгоритма возможно определение не только граничных условий работы ГЗТ, но и его текущих значений.

В качестве практической реализации предложенной методики было разработано программное обеспечение по текущему мониторингу состояния ГЗТ в пролете на основе информации о значениях продольного и поперечного углов провеса ГЗТ, поступающей с сенсоров действующей ВЛ 110 кВ (рис. 7). Программа определяет следующие параметры ГЗТ в пролете ВЛ: стрела провеса, напряжение, длина ГЗТ, тяжение. Одновременно предусмотрена сигнализация при достижении критических параметров ГЗТ.

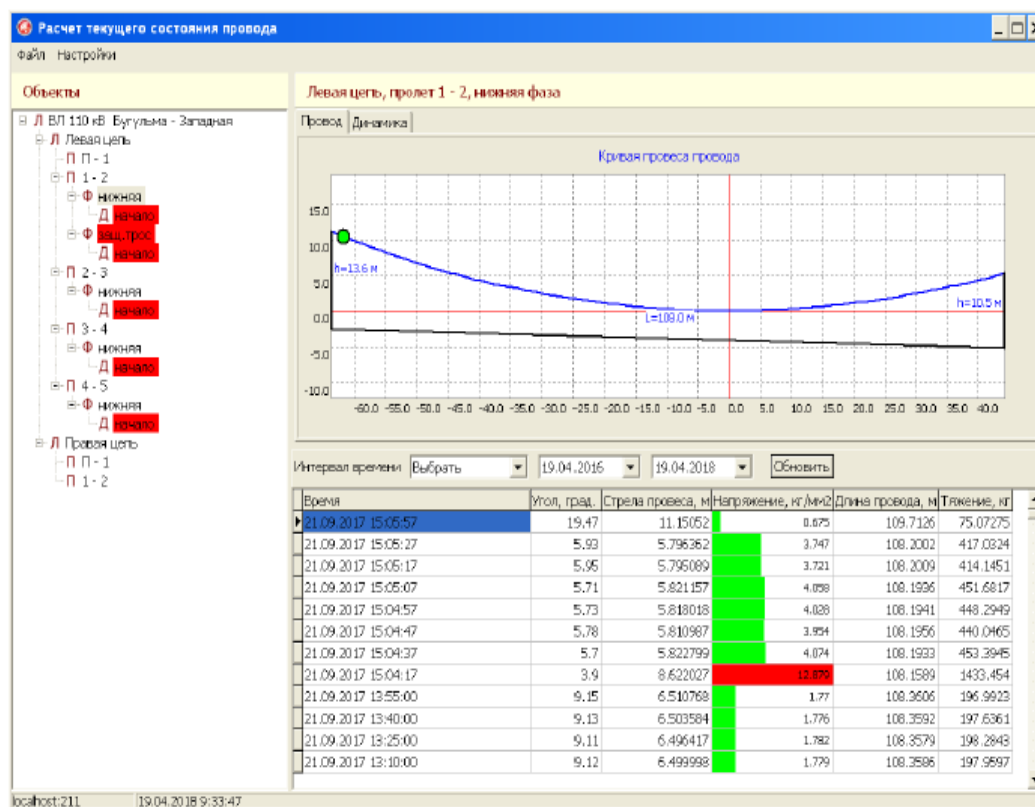


Рис. 7. Диалоговое окно программы расчета текущего состояния ГЗТ

Вывод

Система мониторинга гололедообразований на воздушных линиях электропередачи предоставляет данные о значении температуры ГЗТ, а также о значении продольного угла провеса ГЗТ. Одновременно имеется возможность технического контроля угла поперечного отклонения ГЗТ. Система мониторинга также предоставляет возможность определения действующих значений температуры в ГЗТ. По представленным физическим параметрам программное обеспечение определяет расчетные значения: напряжения, тяжения, стрелы провеса и длины ГЗТ.

Литература

1. Ярославский Д.А., Садыков М.Ф. Разработка устройства для системы мониторинга и количественного контроля гололедообразования на воздушных линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 3–4. С. 69–79.
2. Fedotov A., Kurth S., Voigt S., Vagapov G. A concept for an ice detection system on overhead power lines, theory and practical results // Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Elektroenergetika 2017. pp. 297–300.
3. Макаров В.Г., Федотов А.И., Басыров Р.Ш., Вагапов Г.В. Моделирование воздушной линии электропередачи в пакете Matlab/Simulink // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 13. С. 93–96.
4. Минуллин Р.Г. Локационный метод обнаружения гололеда на проводах воздушных ЛЭП // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 1(22). С. 74–82.
5. Yu S.F.; Gao Y.B.; Hu Y.Z.; Zheng Z.Y.; Ke D.F. A novel on-load de-icing method for distribution lines // 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016). 2016. pp. 1–4.
6. Xu Ji; Erkan Oterkus. A novel dynamic ice-structure interaction model for ice-induced vibrations // 2016 Techno-Ocean (Techno-Ocean). 2016. pp. 70–73.
7. Xingliang Jiang; Ze Xiang; Zhijin Zhang; Jianlin Hu; Qin Hu; Lichun Shu. Predictive Model for Equivalent Ice Thickness Load on Overhead Transmission Lines Based on Measured Insulator String Deviations // IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. V. 29. N 4. pp. 1659–1665.

8. Sahar Lashkarbolooki; Anil Pahwa; Al Tamimi; Ryan Yokley. Decreasing the ice storm risk on power conductors by sequential outages // 2017 North American Power Symposium (NAPS). 2017. pp. 1–4.
9. Xin-bo Huang; Hong-bo Li; Yong-can Zhu; Yu-xin Wang; Xin-xin Zheng; Yi-ge Wang. Transmission line icing short-term forecasting based on improved time series analysis by fireworks algorithm // 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). 2016. pp. 643–646.
10. Xiaoming Rui; Kunpeng Ji; Lin Li; Ghyslaine McClure. Dynamic Response of Overhead Transmission Lines with Eccentric Ice Deposits Following Shock Loads // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. V. 32. N3. pp. 1287–1294.
11. Yaqin Li; Xinwei Qiu; Yiyuan Ge; Junfa Wang; Siyu Chen. Research on the Failure Criterion of Snow-Ice Constitutive Model // 2018 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS). 2018. pp. 409–412.
12. Глазунов А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. М.:Госэнергоиздат, 1956. 192 с.
13. Кесельман Л.М. Основы механики воздушных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 1992. 352 с.
14. Fischer R., Kiesslin F. Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausführung; mit 86 Tabellen 4. Aufl. - Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong; Barcelona; Budapest: Springer, 1993doi: 10.1007/978-3-642-97924-8.
15. Arsalan Habib Khawaja.; Qi Huang; Jian Li.; Zhenyuan Zhang. Estimation of Current and Sag in Overhead Power Transmission Lines with Optimized Magnetic Field Sensor Array placement // IEEE Transactions on Magnetics. 2017, V.1. N. 99.pp 1-1.

Автор публикации

Вагапов Георгий Валериянович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Yaroslavsky DA., Sadykov MF. Development of a device for a system of monitoring and quantitative control of icing on overhead power lines. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2017;3–4:69–79.
2. Fedotov A., Kurth S., Voigt S., Vagapov G. A concept for an ice detection system on overhead power lines, theory and practical results. *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Elektroenergetika* 2017. pp. 297–300.
3. Makarov VG., Fedotov AI., Basyrov RSh., Vagapov GV. Simulation of an overhead power line in Matlab/Simulink. *Bulletin of the technological university*. 2017; 13:93–96.
4. Minullin RG. Locational method of detecting ice on wires of overhead power lines. *Electricity. Transmission and distribution*. 2014;1(22):74–82.
5. Yu SF., Gao YB., Hu YZ., Zheng ZY., et al. A novel on-load de-icing method for distribution lines. *12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016)*. 2016. pp. 1–4.
6. Xu Ji., Erkan Oterkus. A novel dynamic ice-structure interaction model for ice-induced vibrations. *.2016 Techno-Ocean (Techno-Ocean)*. 2016. pp. 70–73.
7. Xingliang Jiang., Ze Xiang., Zhijin Zhang., Jianlin Hu., Qin Hu., Lichun Shu. Predictive Model for Equivalent Ice Thickness Load on Overhead Transmission Lines Based on Measured Insulator String Deviations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014. pp. 1659–1665.
8. Sahar Lashkarbolooki., Anil Pahwa., Al Tamimi., Ryan Yokley. Decreasing the ice storm risk on power conductors by sequential outages. *2017 North American Power Symposium (NAPS)*. 2017. pp. 1–4.
9. Xin-bo Huang., Hong-bo Li., Yong-can Zhu., Yu-xin Wang., Xin-xin Zheng., Yi-ge Wang. Transmission line icing short-term forecasting based on improved time series analysis by fireworks algorithm. *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. 2016. pp. 643–646.
10. Xiaoming Rui., Kunpeng Ji., Lin Li., Ghyslaine McClure. Dynamic Response of Overhead Transmission Lines with Eccentric Ice Deposits Following Shock Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017. pp. 1287–1294.
11. Yaqin Li., Xinwei Qiu., Yiyuan Ge., Junfa Wang., Siyu Chen. Research on the Failure Criterion of Snow-Ice Constitutive Model. *2018 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS)*. 2018. pp. 409–412.

12. Glazunov AA. *Fundamentals of the mechanical part of overhead power lines*. M.: Gosenergoizdat, 1956. 192 p.
13. Keselman LM. *Fundamentals of mechanics of overhead power lines*. M.: Energoatomizdat, 1992. 352 p.
14. . Fischer R.; Kiessling F. *Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausführung*. mit 86 Tabellen .4. Aufl. - Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong; Barcelona; Budapest: Springer, 1993. doi: 10.1007/978-3-642-97924-8.
15. Arsalan Habib Khawaja., Qi Huang., Jian Li., Zhenyuan Zhang. Estimation of Current and Sag in Overhead Power Transmission Lines with Optimized Magnetic Field Sensor Array placement. *IEEE Transactions on Magnetics*.2017.pp. 1-1.

Author of the publication

Georgii V. Vagapov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

20 марта 2019 г.



**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ
МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ**

Н.А. Малёв¹, А.И. Мухаметшин¹, О.В. Погодицкий¹, А.Г. Городнов²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия
maleev@mail.ru

Резюме: Задача оценки и анализа переходных режимов электромеханических преобразователей с получением их математических моделей, с высокой точностью соответствующих объектам исследования, является актуальной на этапах проектирования и эксплуатации. Программные продукты LabView, MatLab Simulink и другие открывают широкие возможности для решения поставленной задачи и позволяют получить достоверные результаты. В работе проведена экспериментально-аналитическая оценка переходных режимов двигателя постоянного тока на базе установки для исследования электрических машин. На основании полученных результатов проведены аппроксимация графиков переходных процессов с применением метода наименьших квадратов и подбор аппроксимирующего полинома соответствующего порядка с наибольшим приближением к динамическим свойствам исследуемого объекта. Произведена оценка динамической точности процесса аппроксимации. Для оценки погрешности применен критерий минимума интеграла от квадрата невязки. Проведенные эксперимент, моделирование переходных процессов и анализ полученных графиков показывают, что полученная математическая модель с большой степенью точности соответствует данным эксперимента. Данное обстоятельство позволяет использовать предложенный метод для контроля вариаций параметров исследуемого объекта и их экспериментально-аналитической оценки на этапах проектирования и контроля функционирования электромеханических преобразователей в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь постоянного тока, аппроксимация, метод наименьших квадратов, экспериментальная установка, невязка, идентификация.

Для цитирования: Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Городнов А.Г. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С.113-122. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-113-122.

**EXPERIMENTAL-ANALYTICAL IDENTIFICATION OF A MATHEMATICAL MODEL
OF A DC MOTOR USING THE LEAST SQUARES METHOD**

NA. Malev¹, AI. Mukhametshin¹, OV. Pogoditsky¹, AG. Gorodnov²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia
maleev@mail.ru

Abstract: The urgency of the problem lies in the formation of mathematical models of electromechanical converters corresponding to the objects of study with high accuracy. An experimental-analytical assessment of transient modes of a DC motor based on an installation for the study of electrical machines has been carried out. Based on the results obtained, an approximation of transient process graphs was carried out using the least squares method and an

approximate polynomial of the corresponding order was selected with the closest imminence to the dynamic properties of the object under study.

Keywords: *electromechanical converter of direct current, approximation, least squares method, experimental setup, discrepancy, identification.*

For citation: Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, Gorodnov AG. Experimental-analytical identification of a mathematical model of a dc motor using the least squares method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):113-122. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-113-122.

Введение

При решении задач анализа и синтеза реальных физических объектов и процессов с применением математических методов возникает необходимость построения соответствующей изучаемому явлению модели. Следует определиться со структурой исследуемого объекта и видом пригодных для его описания моделей, и затем оценить некоторые неизвестные параметры в принятом к рассмотрению виде математической модели [1–3]. Искомые оценки неизвестных параметров можно определить путем обработки входных и выходных сигналов исследуемого объекта на этапе опытного исследования, что составляет задачу экспериментально-аналитической идентификации [4–6]. В результате идентификации создается адекватная математическая модель, позволяющая использовать широкий класс математических методов анализа и синтеза. В этой связи разработка и модернизация способов и алгоритмов идентификации играют важную роль как в теоретических исследованиях, так и в инженерной практике.

Область применения указанных алгоритмов устойчиво растет и особенно важное место они занимают на всех этапах создания, испытаний опытных образцов и эксплуатации объектов электротехнических систем, в частности, электромеханических преобразователей в составе рабочих комплексов [7, 8, 9].

Для решения данного класса задач широкое применение находит метод наименьших квадратов (МНК), особенности применения которого в отношении динамических объектов освещены в соответствующей литературе [1, 4, 11]. Особый интерес представляет решение задач идентификации объектов, динамика которых описывается непрерывными системами дифференциальных уравнений, а измерения производятся в дискретные моменты времени, что соответствует обширному классу прикладных задач [10, 12, 13, 14].

Данная работа посвящена экспериментально-аналитической идентификации математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока.

В качестве объекта исследования рассматривался двигатель постоянного тока типа 4ПБ112М2Г. Паспортные данные двигателя представлены в табл. 1 [15].

Таблица 1

Паспортные данные двигателя 4ПБ112М2Г

$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$2p$	$n_{\text{тах}}, \text{об/мин}$	$J_{\text{ном}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$
220	3	16,2	80	3000	2	4000	0,0235

Методы

Дальнейшее исследование проводилось с применением экспериментальной установки. Установка содержит двигатель постоянного тока (ДПТ) и асинхронный двигатель (АД). Питание ДПТ обеспечивается от четырехквadrантного компактного тиристорного преобразователя постоянного тока бескорпусного исполнения с функцией рекуперации энергии в сеть типа *SPRINT ELECTRIC 3600XRi*. Информация о выходной координате – скорости вращения – поступает с установленного на валу двигателя датчика скорости – тахогенератора с крутизной статической характеристики 20 мВ·мин. Сигнал с тахогенератора поступает на блок согласования, представляющий собой делитель напряжения с коэффициентом передачи 60:1, и затем – на вход восьмиканального последовательного аналогово-цифрового преобразователя *NI 4472* с частотой дискретизации 20 кГц. АЦП подключен к шине *PCI* персонального компьютера.

Программная часть для сбора данных с измерительных каналов испытательного стенда реализована в среде графического программирования *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)*, разработанной компанией *National Instruments* [16–18]. Для анализа и последующей обработки данных используется набор функциональных библиотек. Взаимодействие с оператором осуществляется с помощью интуитивно понятного и сравнительно простого в программировании графического интерфейса с применением языка *G*. С помощью программ-драйверов *LabVIEW* может взаимодействовать с различными платами ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов, а также со специализированными измерительными приборами (осциллографы, анализаторы спектра, генераторы сигналов и т.д.).

Экспериментальные замеры переходных процессов $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$ при пуске двигателя постоянного тока осуществлялись при отсоединенном АД. Результаты эксперимента при пуске вхолостую при номинальных значениях параметров якорной цепи показаны на рис. 1 в виде усредненной зависимости.

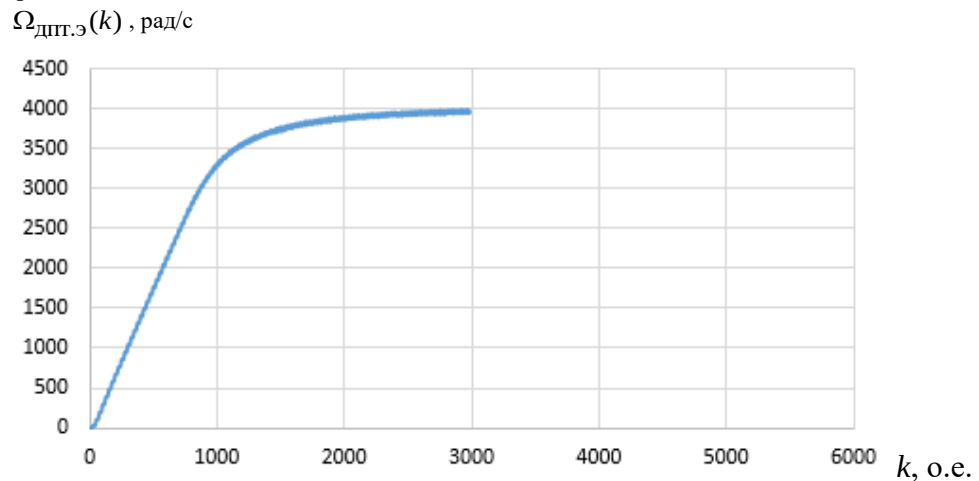


Рис. 1. Усредненная зависимость $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(k)$

Полученная зависимость построена в программной среде *Excel* и позволяет оценить качество переходного процесса. В данном случае процесс является аperiodическим.

Следует отметить, что для обработки результатов эксперимента также в среде *Excel* применена программа, обеспечивающая рациональный выбор количества экспериментальных точек, не влияющий на снижение точности результатов.

Экспериментальная зависимость $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$ (см. рис. 1) характеризуется флуктуациями измеряемой величины. Для их устранения была применена аппроксимация полученных данных методом наименьших квадратов с помощью оператора *polyfit* языка *MatLab*.

Зависимость $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$ представлена массивами $t = \{N \times 1 \text{ double}\}$, $v = \{N \times 1 \text{ double}\}$, где $N = 2980$. Задача аппроксимации экспериментальных данных

$$(t_i, v_i)_{i=1,2,\dots,N} \quad (1)$$

полиномом степени n

$$p^{(n)}(t) = p_1 t^n + p_2 t^{n-1} + \dots + p_n t + p_{n+1} = \sum_{k=1}^{n+1} p_k t^{n-k+1} \quad (2)$$

состоит в решении задачи минимизации

$$\min_{p_1, p_2, \dots, p_{n+1}} \sum_{i=1}^N \left(p^{(n)}(t_i) - v_i \right)^2 \quad (3)$$

Тогда определение аппроксимирующего полинома сводится к поиску минимума функции

$$F(p_1, p_2, \dots, p_{n+1}) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^{n+1} p_k t^{n-k+1} - v_i \right)^2 \quad (4)$$

по переменным $p_1, p_2, \dots, p_{n+1}$.

Функция $F(p_1, p_2, \dots, p_{n+1})$ является квадратичной с неотрицательными коэффициентами, поэтому ее минимум достигается в точке, в которой выполняются условия

$$\begin{cases} \frac{\partial F(p_1, p_2, \dots, p_{n+1})}{\partial p_1} = 0; \\ \frac{\partial F(p_1, p_2, \dots, p_{n+1})}{\partial p_2} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F(p_1, p_2, \dots, p_{n+1})}{\partial p_{n+1}} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Решение данной системы приводит к $(n+1)$ линейным алгебраическим уравнениям для вычисления коэффициентов $p_1, p_2, \dots, p_{n+1}$ полинома n -ой степени:

$$\sum_{k=1}^{n+1} \left(\sum_{i=1}^N t_i^{n-j+1} t_i^{n-k+1} \right) p_k = \sum_{i=1}^N t_i^{n-j+1} v_i, \quad j = 1, 2, \dots, n+1 \quad (6)$$

или в матричной форме

$$A = pz \quad (7)$$

где $p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{n+1} \end{bmatrix}$; $a_{jk} = \sum_{i=1}^N t_i^{n-j+1} t_i^{n-k+1}$; $z_j = \sum_{i=1}^N t_i^{n-j+1} v_i$; $j, k = 1, 2, \dots, n+1$.

Следует отметить, что оператор *polyfit*, в отличие от метода нормальных уравнений, предполагающего решение (7), реализует подход, более устойчивый к вычислительным ошибкам [1]. С этой целью формируется прямоугольная матрица V из N строк и $(n+1)$ -го столбца, элементами которой являются степени t_j :

$$V = \begin{bmatrix} t_1^n & t_1^{n-1} & \dots & t_1 & 1 \\ t_2^n & t_2^{n-1} & \dots & t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ t_{N-1}^n & t_{N-1}^{n-1} & \dots & t_{N-1} & 1 \\ t_N^n & t_N^{n-1} & \dots & t_N & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Матрица A системы (1) связана с матрицей V следующим образом:

$$A = V^T V. \quad (9)$$

Вектор z правой части (1) выражается через вектор $v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{N-1} \\ v_N \end{bmatrix}$ как

$$z = V^T v \quad (10)$$

При выполнении функции *polyfit* определяется QR -разложение матрицы V на основе ортогональной матрицы Q и верхней треугольной матрицы R , таких, что $V = QR$. Затем система линейных уравнений

$$QRp = v \quad (11)$$

решается следующим образом: вычисляется $Q^T v$; решается система с верхней треугольной матрицей $Rp = Q^T v$ и находится вектор p , содержащий коэффициенты $p_1, p_2, \dots, p_{n+1}$ искомого аппроксимирующего полинома.

$$\text{Ошибка аппроксимации } e = \sum_{i=1}^N \left(p^{(n)}(t_i) - v_i \right)^2 \quad \text{для найденного полинома}$$

$p^{(n)}(t) = p_1 t^n + p_2 t^{n-1} + \dots + p_n t + p_{n+1}$ вычисляется по формуле

$$e = \|v - Vp\|. \quad (12)$$

Результаты

Произведем вычисление аппроксимирующего полинома для экспериментальной зависимости $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$ с применением следующей программы:

```
x1=[t]; % значения зависимости  $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$  по оси абсцисс;
y1=[v]; % значения зависимости  $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$  по оси ординат;
p=polyfit(x1,y1,6); % оператор, вычисляющий коэффициенты  $p$  полинома  $n$ -й
степени для массивов  $t, v$  методом наименьших квадратов;
xx1=linspace(x1(1), x1(end), 100); % оператор, формирующий линейный массив
размера 1 x 100, начальным и конечным элементами которого являются точки  $x1(1)$  и
 $x1(end)$ ;
```

```
yy1=polyval(p, xx1); % оператор, вычисляющий значения полинома  $p^{(n)}(t)$  на
области определения данных между  $x1(1)$  и  $x1(end)$ ;
```

```
plot(x1,y1,'-',xx1,yy1)
```

```
p =
```

```
Columns 1 through 3
```

```
78325.2549791148 -287389.565371582 403394.63004533
```

```
Columns 4 through 6
```

```
-259979.405235382 63988.1830483225 5610.87331077735
```

```
Column 7
```

```
3.95608900692515
```

В результате был определен полином шестого порядка:

$$\Omega_{\text{МНК}}(t) = 78325,255t^6 - 287389,565t^5 + 403394,63t^4 - 259979,405t^3 + 63988,183t^2 + 5610,873t + 3,956. \quad (13)$$

В целях уменьшения вычислительных погрешностей полиномиального приближения целесообразно применить нормализацию данных [23, 24], которая состоит в замене t_i на $\hat{t}_i$, вычисляемых по формуле

$$\hat{t}_i = \frac{t_i - \mu}{\sigma}, \quad (14)$$

где μ – среднее значение; σ – среднеквадратичное отклонение. Данные величины вычисляются по следующим выражениям:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i; \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \mu)^2}. \quad (15)$$

Нормализация данных выполняется автоматически с помощью оператора *polyfit* при обращении к нему с тремя выходными аргументами. В третьем аргументе возвращается вектор из двух компонент, первой из которых является среднее значение μ , а второй – среднеквадратичное отклонение σ . Этот вектор используется при вычислении коэффициентов аппроксимирующего полинома с помощью оператора *polyval* и указывается в качестве четвертого аргумента. Чтобы пропустить третий входной аргумент оператора *polyval*, используется пустой массив. После нормализации данных получены следующие результаты:

$$\begin{aligned} \Omega_{\text{МНК}}^{\text{норм}}(t) &= 41,037t^6 - 103,773t^5 - 124,456t^4 + 567,857t^3 - \\ &\quad - 587,983t^2 + 369,776t + 3753,96; \\ \mu &= 0,492; \quad \sigma = 0,284. \end{aligned}$$

Малое значение среднеквадратичного отклонения $\sigma = 0,284$ говорит о том, что найденное решение можно считать хорошо обусловленным.

Графики зависимостей, полученных экспериментальным путем $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$ и с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов $\Omega_{\text{МНК}}(t)$, приведены на рис. 2.

$\Omega_{\text{дпт.э}}(t)$, $\Omega_{\text{мнк}}(t)$, рад/с

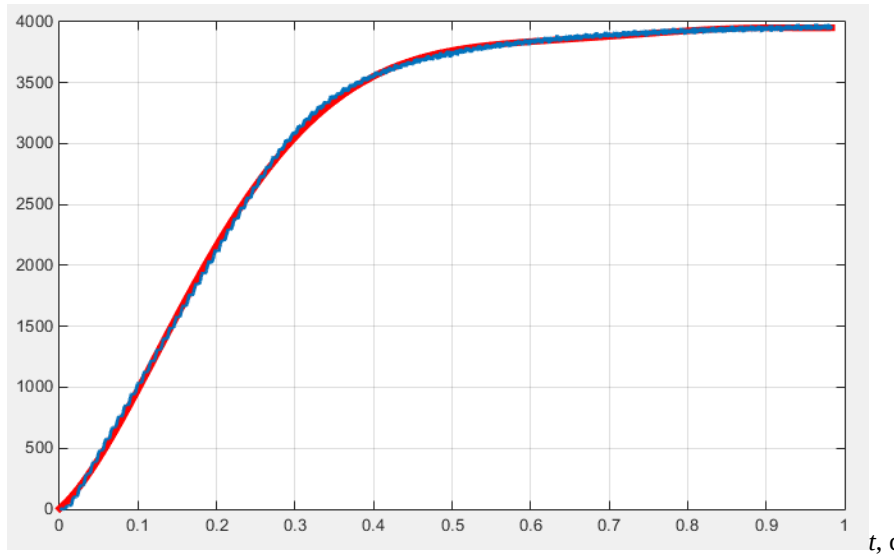


Рис. 2. Графики экспериментальной зависимости $\Omega_{\text{дпт.э}}(t)$ (синий) и зависимости $\Omega_{\text{мнк}}(t)$ (красный), полученной при аппроксимации методом наименьших квадратов

Из рисунка видно, что аппроксимирующая кривая $\Omega_{\text{мнк}}(t)$ с высокой точностью повторяет экспериментальную кривую, что подтверждает достоверность полученных результатов. Дополнительные исследования, направленные на уменьшение порядка полинома, показали, что полиномы меньших порядков не дают требуемого приближения.

Обсуждение

Отметим, что в переходном режиме (см. рис. 2) имеют место несовпадения экспериментальной кривой $\Omega_{\text{дпт.э}}(t)$ и кривой $\Omega_{\text{мнк}}(t)$, полученной методом наименьших квадратов, что подтверждает наличие динамической погрешности. Оценку динамической погрешности произведем на основе вычисления невязки (разности) ϵ между показанными на рис. 2 кривыми с применением линейного интегрального критерия [19–21]:

$$Q_{\epsilon} = \int_0^{\tau} [\Omega_{\text{дпт.э}}(t) - \Omega_{\text{мнк}}(t)] dt, \quad (16)$$

где $\tau = 0,92$ с – время эксперимента.

Вычисление критерия Q_{ϵ} осуществляется при помощи *Simulink*-модели, показанной на рис. 3.

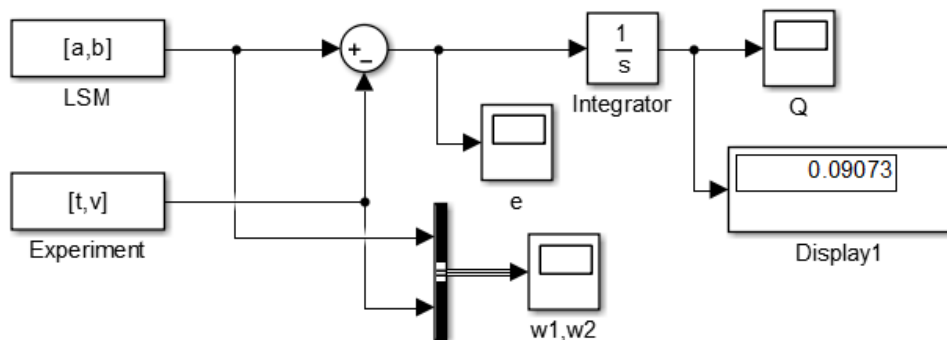


Рис. 3. Simulink-модель для оценки точности аппроксимации

Экспериментальные данные размещены в рабочей области *Workspace*, содержащей временной массив t и массив выходной координаты v в блоке *Experiment*. Блок *LSM* содержит массивы данных $a = \{N \times 1 \text{ double}\}$, $b = \{N \times 1 \text{ double}\}$, полученные в результате расчета методом наименьших квадратов. На выходе сумматора формируется сигнал невязки ϵ . На выходе блока *Integrator* формируется линейный интегральный критерий $Q(\epsilon)$, числовое значение которого фиксируется блоком *Display1* по окончании переходного

процесса. Переходные процессы на выходах блоков *LSM* и *Experiment* фиксируются в виде выходных координат $w_1 = \Omega_{\text{МНК}}(t)$ и $w_2 = \Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$.

На рис. 4 показан график невязки ϵ .

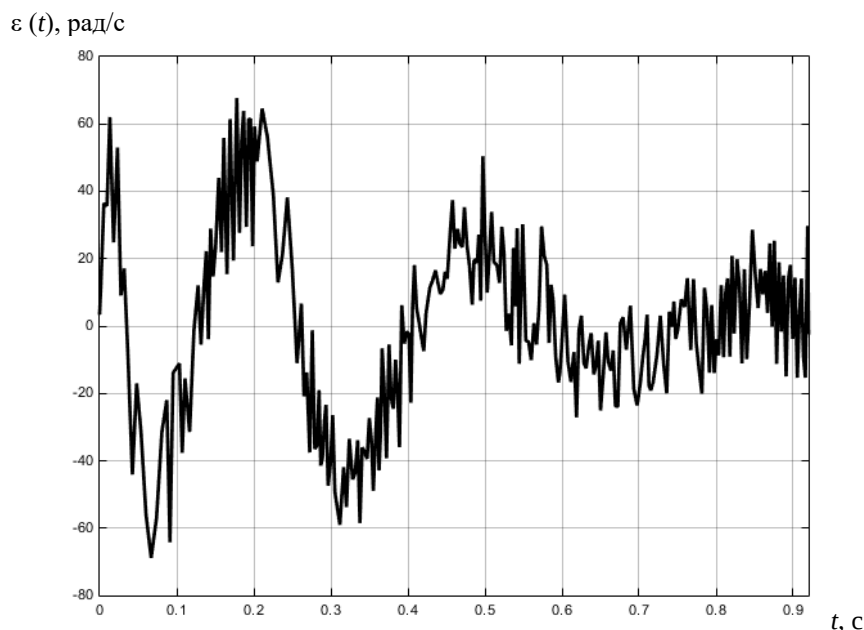


Рис. 4. График невязки $\epsilon(t)$

Анализ графика показывает, что процесс характеризуется флуктуациями, что очевидно, поскольку подобными флуктуациями сопровождается зависимость, полученная экспериментально. Переходный процесс длится 0,92 с и усредненное установившееся значение приближается к оси абсцисс.

На рис. 5 показан график зависимости $Q_\epsilon(t)$, который характеризует динамическую точность процесса аппроксимации.

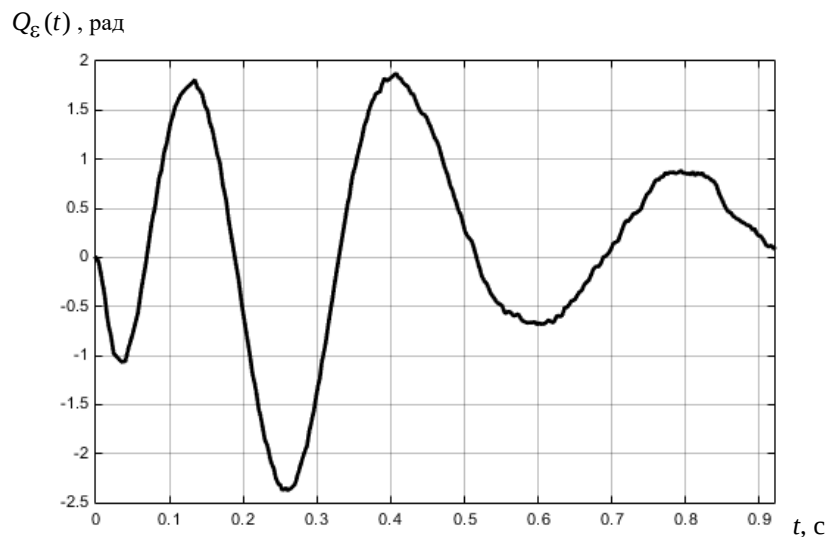


Рис. 5. График линейного интегрального критерия $Q_\epsilon(t)$

Переходный процесс характеризуется максимальным отклонением 1,75 рад и постепенным затуханием до 0,09 рад ко времени окончания эксперимента, что подтверждает малую погрешность аппроксимации. В настоящей работе, в отличие от результатов, представленных в [19], знак $Q_\epsilon(t)$ не имеет принципиального значения. В этой связи для оценки погрешности аппроксимации целесообразно использовать хорошо зарекомендовавший себя для решения практических задач критерий минимума интеграла от квадрата невязки $Q_\epsilon^2(t)$, график которого показан на рис. 6.

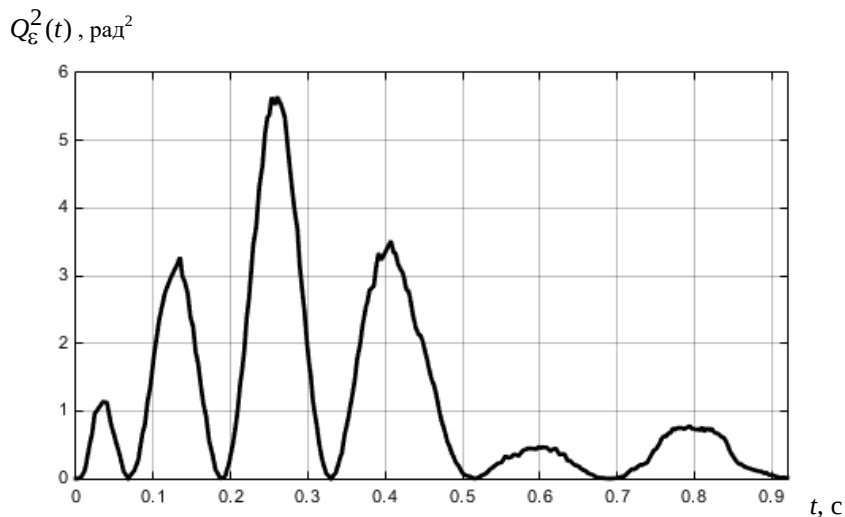


Рис. 6. График интеграла от квадрата невязки $Q_{\varepsilon}^2(t)$

Установившееся значение приведенного на рис. 5 критерия приближается к нулю и составляет $Q_{\varepsilon, \text{уст}}^2 = 0,008 \text{ рад}^2$, что подтверждает требуемую точность проведенной экспериментально-аналитической идентификации модели электромеханического преобразователя постоянного тока.

Выводы

Проведенные исследования дают возможность получения уравнений динамики по результатам эксперимента и показывают целесообразность предложенного подхода для анализа динамических свойств электромеханических преобразователей на этапе проектирования и контроля их функционирования в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов.

Литература

1. Коугия В.А. Избранные труды. Исследования по теории математической обработки результатов измерений: монография. СПб.: ПГУПС, 2012. 447 с.
2. Седова И.Ю., Юдина О.И. Исследование параметров математической модели для расчета добавочных потерь в двигателе постоянного тока при импульсном питании. Ставрополь: Северо-Кавказский государственный технологический университет. 2007.
3. Abell J. MATLAB and SIMULINK. Modeling Dynamic Systems. Create Space Independent Publishing Platform, Seattle, 2016.
4. Колеснев А.С., Котин А.И., Матвеева Т.А., Зотова С.А. Сглаживание экспериментальных зависимостей по методу наименьших квадратов // Современные наукоемкие технологии. 2014. №5-2. С. 193.
5. Zeyuan Allen-Zhu, Yuanzhi Li, Aarti Singh, and Yining Wang. Near-optimal design of experiments via regret minimization. In Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning. Proceedings of Machine Learning Research. Sydney, Australia, August 2017. pp. 126–135
6. Oluic, M., Ghandhari, M., and Berggren, B. Methodology for rotor angle transient stability assessment in parameter space. IEEE Trans. Power Syst. 2016.V. 32. N. 2. pp. 1202–1211.
7. Кашаев Р.С., Свинин А.Ю., Козелков О.В. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т.20. №11-12. С.152-160.
8. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н., Корнилов В.Ю. 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.
9. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Исследование и синтез модального регулятора двухмассовой электромеханической системы механизма подъёма крана // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т 20. №7-8. С.99-106.
10. Малёв Н .А., Погодицкий О .В. Статистический анализ динамических характеристик асинхронного электромеханического преобразователя с изменяющимися параметрами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019.Т.21.№ 1-2. С.120–130.

11. Meurice, L. Nagy, C. Cleve, A. Static analysis of dynamic database usage in Java systems. In: Nurcan, S. Soffer, P. Bajes, M. Eder, J. (eds.) CAiSE 2016. LNCS2016.V. 9694, pp. 491–506. Springer, Cham.
12. Кислицын А.Л. Вопросы теории и проектирования электрических машин. Параметры и характеристики электрических машин в статических и динамических режимах // Сборник научных трудов. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. 304 с.
13. Шмарин Я.А., Кодкин В.Л. Экспериментальное исследование синхронного двигателя с постоянными магнитами // ВЕСТНИК Российского национального комитета СИГРЭ. Выпуск № 7. Материалы Молодежной секции РНК СИГРЭ: сборник конкурсных докладов «Энергия-2015» по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. 118 с.
14. Крупович В.И., Барыбин Ю.Г. Самиовер М.Л. Проектирование электроснабжения. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1980. 456 с.
15. Кацман М.М. Электрические машины. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 480 с.
16. Ehsani B. Data Acquisition using LabVIEW. Packt Publishing, 2016. P. 166.
17. Бадыштова К.Д., Грабовый К.Д., Щербань И.В. Комплект виртуальных приборов National Instruments для схемотехнического моделирования аналоговых динамических объектов // Международный научный журнал «Символ науки» 2016;6:43–46.
18. Yang Y. LabVIEW Graphical Programming Cookbook. Packt Publishing, 2014. P. 252
19. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Любарчук Ф.Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели // Вестник КГЭУ. 2019. №1. С. 60–67.
20. M.A. Khanesar, Y. Oniz, O. Kaynak et al., "Direct model reference adaptive fuzzy control of networked SISO nonlinear systems"// IEEE/ASME Trans. Mechatronics. V.21. №1. pp. 205-213, 2016.
21. Kim, S., Overbye, T. J. Mixed transient stability analysis using AC and DC models // IEEE Trans. Power Syst. 2016.V. 31. N. 2. pp. 942–948.
22. G. De La Torre, T. Yucelen, E.N. Johnson. A new model reference control architecture: stability performance and robustness, Int. J. Robust Nonlinear Control. 2016.V.26.№ 11. pp. 2355–2377.
23. B. Rashidi, M. Esmaeilpour, M.R. Homaeinezhad. Precise angular speed control of permanent magnet DC motors in presence of high modeling uncertainties via sliding mode observer-based model reference adaptive algorithm // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. 2015.V. 1. N. 28. pp. 79–95.
24. H.H. Pan, W.C. Sun, H.J. Gao, "Disturbance observer-based adaptive tracking control with actuator saturation and its application" // IEEE Trans. Autom. Sci. Eng. 2016. V. 13.N 2. pp. 868–875.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Мухаметшин Азат Ильдусович – ассистент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Городнов Антон Геннадьевич – старший преподаватель кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ).

References

1. Kougia VA. Selected Works. *Studies in the theory of mathematical processing of measurement results: a monograph*. SPb.: PGUPS, 2012. 447 p.
2. Sedova IYu., Yudina OI Study of the parameters of the mathematical model for calculating the additional losses in a DC motor with pulsed power .Sev.-Kavk. state tech. un-t. Stavropol, 2007.
3. Abell, J. *MATLAB and SIMULINK. Modeling Dynamic Systems*. Create Space Independent Publishing Platform, Seattle, 2016.
4. Kolesnev AS., Kotin AI., Matveeva TA., Zotova SA. Smoothing of experimental dependencies by the least squares method . *Modern high technologies*. 2014;5(2):193.
5. Zeyuan Allen-Zhu, Yuanzhi Li, Aarti Singh, and Yining Wang. Near-optimal design of experiments via regret minimization. *In Proceedings of the 34th International Conference on Machine*

Learning, volume 70 of *Proceedings of Machine Learning Research*. 2017. Sydney, Australia, August. pp. 126–135.

6. Oluic, M., Ghandhari, M., and Berggren, B. Methodology for rotor angle transient stability assessment in parameter space. *IEEE Trans. Power Syst.* 2016. pp. 1202–1211.

7. Kashaev PS., Svinin AY., Kozelkov OV. Minimization of experiment errors in the method of PMR and opportunities for receiving of relaxation times spectra. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018; 20(11-12):152-160.

8. Petrov TI., Safin AR., Ivshin IV., Tsvetkov AN., Kornilov VY. Model of the control system rocking machines of oil the basic of a synchronous engines with the sensorless method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018; 20(7-8):107-116.

9. Malev NA., Pogoditsky OV. Research and synthesis of the modal regulator of the two-mass electromechanical system of the crane lifting mechanism. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2018; 20(7-8):99-106.

10. Malev NA., Pogoditsky OV. Statistical analysis of dynamic characteristics asynchronous electric motor with changing load parameters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(1-2):120-130.

11. Meurice, L. Nagy, C. Cleve, A. Static analysis of dynamic database usage in Java systems. In: Nurcan, S. Soffer, P. Bajes, M. Eder, J. (eds.) CAiSE 2016. LNCS.V. 9694. pp. 491–506. Springer, Cham (2016).

12. Kisilitsyn AL. (Ed.) Questions of the theory and design of electrical machines. Parameters and characteristics of electric cars in static and dynamic modes. *Collection of scientific papers*. Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk: UIGTU, 2017. 304 p.

13. Shmarin YaA., Kodkin VL. Experimental study of synchronous motors with permanent magnets. - *BULLETIN of the CIGRE Russian National Committee Materials of the 7 th Youth Section of the RNC CIGRE: a collection of competitive reports "Energy-2015" in the field of electricity and electrical engineering in the areas of CIGRE research*. Ivanovo, 2015. 118 p.

14. Krupovich VI., Barybin YuG. Samover ML. *Handbook of power supply design*. 3rd ed. M.: Energy, 1980. 456 p.

15. Katzman MM. *Handbook of electric machines*. M.: Publishing Center "Academy", 2005. 480 p.

16. Ehsani B. Data Acquisition using LabVIEW. Packt Publishing, 2016. 166 p.

17. Badyshtova KD., Grabovy KD., Shcherban IV. Set of VI for simulation of analog dynamic objects implemented by means of National Instruments tools. *International Scientific Journal "Symbol of Science"* 2016; 6:43-46.

18. Yang Y. LabVIEW Graphical Programming Cookbook. Packt Publishing, 2014. 252 p.

19. Malev NA., Pogoditsky OV., Lyubarchuk FN. Analysis of changes in the parameters of an asynchronous motor by a linear integral criterion using a reference model. *Bulletin of KSPEU*. 2019. №1. pp. 60–67.

20. Khanesar MA, Y. Oniz, O. Kaynak et al., "Direct model reference adaptive fuzzy control of networked SISO nonlinear systems". *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*. 2016, pp. 205-213.

21. Kim, S., Overbye, T. J. Mixed transient stability analysis using AC and DC models. *IEEE Trans. Power Syst.* 2016. pp. 942–948.

22. La Torre GDe, Yucelen T., Johnson EN., "A new model reference control architecture: stability performance and robustness". *Int. Journal Robust Nonlinear Control*, 2016; 26 (11):2355-2377.

23. Rashidi B., Esmaeilpour M., Homaeinezhad MR., "Precise angular speed control of permanent magnet DC motors in presence of high modeling uncertainties via sliding mode observer-based model reference adaptive algorithm". *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*. 2015. pp. 79-95

24. Pan HH., Sun WC., Gao HJ., "Disturbance observer-based adaptive tracking control with actuator saturation and its application", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, pp. 868-875, 2016.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Azat I. Mukhametshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Anton G. Gorodnov – Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia.



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

А.В. Голенищев-Кутузов, Д.А. Иванов, А.А. Потапов, В.И. Кротов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

alex.kutuzov@mail.ru

Резюме: В электроэнергетике России и за рубежом особое внимание обращено на проблему возрастания числа возникших из-за повреждений высоковольтных изоляторов (ВИ) аварий в высоковольтном оборудовании. Был проведен анализ аварийных ситуаций на подстанциях и открытых распределительных устройствах [1,2,3], показавший, что причинами повреждения ВИ в большинстве случаев являются естественное старение в приложенном электрическом поле (ЭП), перенапряжения и наличие первоначальных дефектов при изготовлении ВИ. Опираясь на этот факт, нами разрабатывались различные методы бесконтактной диагностики ВИ с целью выявления дефектов на ранней стадии их развития. Особое внимание было обращено на метод частичных разрядов (ЧР), поскольку характеристики ЧР позволяют получить информацию о параметрах дефектов.

В статье описан комплекс бесконтактных методов для проведения дистанционной диагностики высоковольтных изоляторов; двухканальный метод дистанционной диагностики рабочего состояния высоковольтных изоляторов, основанный на регистрации частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками; устройство, позволяющее проводить визуальный контроль и поиск неисправного высоковольтного оборудования; дистанционный бесконтактный метод регистрации электрических полей высокой напряженности промышленной частоты, а также их пространственной ориентации на основе электрооптического эффекта.

Мы разработали макет мобильного прибора для реализации методик исследования высоковольтных диэлектрических элементов для диагностики их технического состояния с помощью описанного комплекса бесконтактных методов. Измерительное устройство в составе мобильного диагностического прибора состоит из набора сенсоров для сбора диагностической информации, детектированной электромагнитным, акустическим и электрооптическим датчиками и сигнала фазы напряжения, приложенного к исследуемому ВИ. Одновременное использование сразу нескольких датчиков позволило повысить точность локализации ЧР в ВИ. Визуализация результатов диагностики возможна на диспетчерском пункте в виде амплитудно-фазовых, частотно-фазовых и амплитудно-частотных диаграмм распределения характеристик частичных разрядов и на портативном устройстве в виде интенсивности излучения с выбранного датчика. Мобильный диагностический прибор позволил в лабораторных условиях выполнить изучение электрофизических процессов в различных диэлектрических материалах и изделиях под воздействием сильных переменных электрических полей. Выполнено изучение особенностей дефектов на стержне и контакте «стержень-оконцеватель», построена схема электрофизических процессов, сопровождающих излучение ЧР, и установлены причины их возникновения.

Ключевые слова: дистанционная диагностика, частичные разряды, неразрушающий контроль, высоковольтные изоляторы, фотонный кристалл, дефекты изоляции, мобильный диагностический прибор

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-08-00203.

Для цитирования: Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Потапов А.А., Кротов В.И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С. 123-133. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133.

USING CONTACTLESS METHODS OF DIAGNOSTICS OF HIGH ELECTRIC FIELDS

AV. Golenischev-Kutuzov, DA. Ivanov, AA. Potapov, VI. Krotov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

alex.kutuzov@mail.ru

Abstract: *In the electric power industry of Russia and abroad, special attention is paid to the problem of an increase in the number of accidents caused by damage to high-voltage insulators in high-voltage equipment. An analysis of emergencies at substations and open switchgears [1-2, 4] was carried out, which showed that in most cases the causes of damage to high-voltage insulators are natural aging in an applied electric field, overvoltage, and the presence of initial defects in the manufacture of high-voltage insulators. Based on this fact, we developed various methods of non-contact diagnostics of high-voltage insulators in order to identify defects at an early stage of their development. Particular attention was paid to the method of partial discharges because the characteristics of partial discharges provide information on the parameters of defects.*

The article describes a set of non-contact methods for remote diagnostics of high-voltage insulators; a two-channel method for remote diagnostics of the operating state of high-voltage insulators, based on the registration of partial discharges by electromagnetic and acoustic sensors; a device that allows visual inspection and the search for faulty high-voltage equipment; remote non-contact method for recording electric fields of high tension of industrial frequency, as well as their spatial orientation based on the electro-optical effect.

We developed a mock-up of a portable diagnostic device for implementing research methods for high-voltage dielectric elements to diagnose their technical condition using the described complex of non-contact methods. The measuring device as part of a portable diagnostic device consists of a set of sensors for collecting diagnostic information detected by electromagnetic, acoustic and electro-optical sensors and a voltage phase signal applied to the studied high-voltage insulator. The simultaneous use of several sensors at once made it possible to increase the accuracy of localization of partial discharges in high-voltage insulators. Visualization of diagnostic results is possible at the control room in the form of amplitude-phase, frequency-phase and amplitude-frequency diagrams of the distribution of characteristics of partial discharges and on a portable device in the form of radiation intensity from the selected sensor. A portable diagnostic device made it possible in laboratory conditions to study electrophysical processes in various dielectric materials and products under the influence of strong alternating electric fields. A study was made of the features of defects on the rod and the terminal-terminal contact, a diagram of the electrophysical processes accompanying the emission of partial discharges was constructed, and the causes of their occurrence were established.

Keywords: *remote diagnosis, partial discharges, nondestructive testing, high-voltage insulators, Photonic Crystal, insulation defects, portable diagnostic tool*

Acknowledgments: *The work, which is made an article is made with the financial support of RUSSIAN FOUNDATION for BASIC RESEARCH under the research project No. 18-08-00203.*

For citation: Golenischev-Kutuzov AV, Ivanov DA, Potapov AA, Krotov VI. Using contactless methods of diagnostics of high electric fields. *Power engineering: research, equipment, technology*.2019;21(4):123-133. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133.

Введение

В настоящее время в условиях активно развивающейся электроэнергетической отрасли становится все более актуальной проблема регистрации электрических полей промышленной частоты (50 – 60 Гц), являющихся частью сверх низкочастотного диапазона радиочастотного спектра, наиболее распространенного как в производственных условиях, так и в быту. На производстве эти поля генерируются таким оборудованием, как линии электропередачи, открытые распределительные устройства, токопроводы, различные высоковольтные аппараты, трансформаторы, высоковольтные вводы, устройства защиты и автоматики, сборные соединительные шины, коммутаторы и т. д. Все эти устройства оказывают сильное негативное влияние не только на электронную

технику, но, самое главное, и на окружающих людей. Воздействие на организм человека может приводить к нарушениям в работе нервной и сердечно-сосудистой систем, к изменениям в составе крови. Степень воздействия, в первую очередь, зависит от интенсивности и продолжительности излучения. Длительные воздействия приводят к патологиям различных органов. В соответствии с санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами предельно допустимый уровень напряженности поля на рабочих местах обслуживающего персонала при воздействии в течение 1 ч за смену – 60 кВ/м. При этом неисправное электрооборудование может выступать дополнительным источником высоко- и низкочастотного излучения.

Литературный обзор

Начиная с конца XX века стал постепенно изменяться взгляд на диагностику рабочего состояния высоковольтного оборудования: от стендового контроля с выводом оборудования из эксплуатации к дистанционному контролю оборудования под рабочим напряжением. Однако до сих пор для реального обследования высоковольтных изоляторов предусмотрен только контактный электрический способ измерения параметров частичных разрядов, что закреплено в новых стандартах. Согласно мировым данным по использованию дистанционных методов инспекции воздушных линий электропередачи и открытых распределительных устройств подстанций, больше чем 40 % компаний продолжают, в основном, осматривать оборудование визуально. Инфракрасную диагностику и наблюдения приборами ночного видения применяют примерно 15 % предприятий. Только небольшая часть предприятий использует радио и ультразвуковой контроль.

Таким образом, представляется крайне важной возможность бесконтактного обнаружения источников электрических полей для определения степени их влияния на окружающее пространство. Кроме того, регистрация локальных перенапряжений в обмотках трансформаторов, в высоковольтных изоляторах и кабелях может указывать на присутствие дефектов изоляции, которые, в конце концов, становятся причиной повреждений и даже разрушений изоляционных элементов. Именно поэтому необходимо контролировать возникновение локальных перенапряжений в процессе эксплуатации высоковольтной изоляции. А это наиболее удобно осуществлять дистанционно и бесконтактно, так как в этом случае нет необходимости вывода оборудования из эксплуатации. Однако до последнего времени, несмотря на актуальность поставленной задачи, степень разработанности подобных способов контроля крайне мала [3–7]. И хотя уже существуют отдельные попытки их создания [8, 9], они до сих пор не нашли широкого применения в высоковольтных системах. Недостаточная разработанность дистанционных бесконтактных методов контроля перенапряжений в высоковольтной изоляции побудила нас продолжить исследования в этом направлении. То есть целью наших изысканий стало создание способа бесконтактного дистанционного измерения электрических полей на различных видах высоковольтной изоляции, в котором устранены недостатки предыдущих разработок. Другими словами, необходима разработка комплексного метода и соответствующего ему приборного обеспечения для непрерывной бесконтактной диагностики рабочего состояния на всех этапах эксплуатации высоковольтных изоляторов, начиная с момента включения их в электрическую сеть. Результатом исследований должно стать обеспечение возможности регистрации момента возникновения преддефектного состояния за счет выявления областей с повышенной напряженностью электрического поля и измерения градиентов напряженности электрического поля в этих областях с последующим выделением дефектов.

Методика исследования

Двухканальный метод, включающий электромагнитный и акустический методы диагностики, заключается в следующем. Регистрация электромагнитных импульсов частичных разрядов (далее – ЧР) (рис.1) осуществляется электромагнитным датчиком – в данном случае направленной антенной, позволяющим детектировать импульсы в интервале частот 0,5 – 600 МГц. Регистрация акустических импульсов осуществляется акустическим датчиком, которым является активная параболическая антенна, работающая на частоте 40 кГц. Выбор частоты измерений был обоснован такими факторами, как частотная зависимость затухания волн, производственные шумы и электромагнитные помехи окружающего электрического оборудования. Так акустические шумы доминируют в низкочастотной области (20–20 кГц), верхний частотный предел ограничен частотной зависимостью затухания ($f \geq 100$ кГц). В интервале 35 – 45 кГц, как показали эксперименты, при отношении сигнал/шум ≈ 2 акустические импульсы от ЧР регистрируются на расстоянии 15 – 25 м. С учетом низкочастотных производственных

электромагнитных помех в диапазоне 50–200 МГц и выше 600 МГц наиболее предпочтительными для электромагнитной регистрации ЧР являются полосы 20–50 МГц и 400–550 МГц, причем интенсивность сигналов ЧР значительно выше во второй полосе, чем в первой.

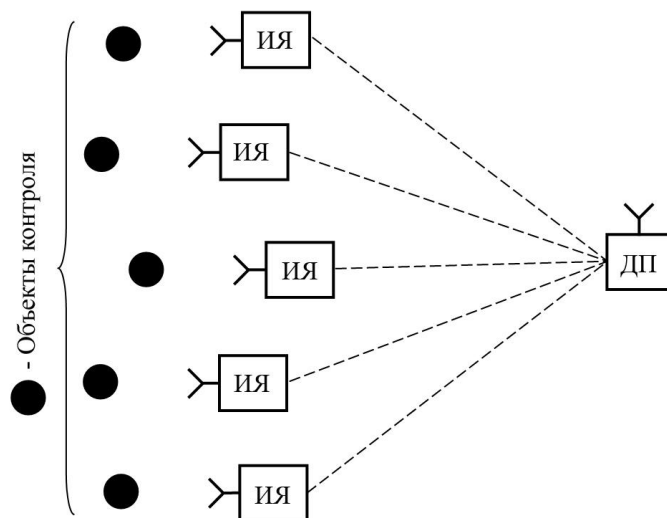


Рис. 1. Схематичное расположение измерительного комплекса:
ИЯ – измерительная ячейка, ДП – диспетчерский пункт

При использовании направленной антенны комплекс обеспечивает локализацию источника сигналов с точностью до 1–2 метров с расстояния 5–10 метров даже в полевых условиях при большом количестве источников сигналов и отражающих поверхностей. В диапазоне СВЧ уровень помех значительно ниже и можно использовать антенны с высокой степенью направленности, обеспечивающие локализацию источника сигналов в хороших условиях с точностью локализации порядка 0,5 метра. Эти датчики наиболее чувствительны к дефектам в наружных частях оборудования.

Входящий в состав комплекса акустический датчик позволяет провести довольно точную локализацию источника сигналов внутри объекта низкочастотных ЧР [10]. При этом измеряется задержка момента прихода акустического импульса относительно электрического сигнала в нескольких точках оборудования и, на основании этого, вычисляется ориентировочное положение источника с учетом конструкции конкретного объекта. Акустические датчики практически не подвержены внешним помехам на силовом оборудовании подстанций.

Схематичное расположение измерительных ячеек в составе комплекса с объектами измерения показано на рис. 1. Акустические и электромагнитные датчики, подключенные к АЦП с модулем беспроводной сети автоматизации процессов (далее – БСАП), помещаются рядом с объектом контроля. Данные, получаемые от датчиков (далее – ИЯ), посредством модуля БСАП собираются и передаются на диспетчерский пункт (далее – ДП).

Модуль БСАП представляет собой микроконтроллерное устройство с радиопередатчиком, работающим по стандарту *IEEE 802.15.4* на программном обеспечении собственного производства. В зависимости от прикладных задач модуль БСАП может использоваться отдельно как радиопередающее устройство, так и с шлюзованием данных на нужный протокол (*USB, RS-485, PLC* и т.д.) [11, 12].

Метод визуального контроля и поиска неисправного оборудования заключается в следующем [13]. Мы разработали конструкцию портативного прибора, позволяющего визуально определять дефекты в высоковольтном оборудовании. Схема использования устройства показана на рис. 2. В состав устройства входят: акустический датчик, электромагнитный датчик, мобильный телефон с видеокамерой, программное обеспечение. Для выявления неисправного оборудования необходимо направить устройство камерой телефона на обследуемый участок объекта. Входящие в состав комплекса датчики выявляют сигналы с неисправного оборудования и, с помощью установленного на телефоне программного обеспечения, накладывают интенсивность сигнала с датчиков на картинку с камеры (рис. 2).

Выявление дефектных изоляторов из общей системы высоковольтных изоляторов,

находящихся под рабочим напряжением и расположенных на определенных расстояниях друг от друга на распределительных узлах и подстанциях, представляет весьма сложную задачу [14]. Исходя из этих условий, нами было разработано портативное устройство для визуального выявления неисправных изоляторов и другого высоковольтного оборудования на объектах энергетики.

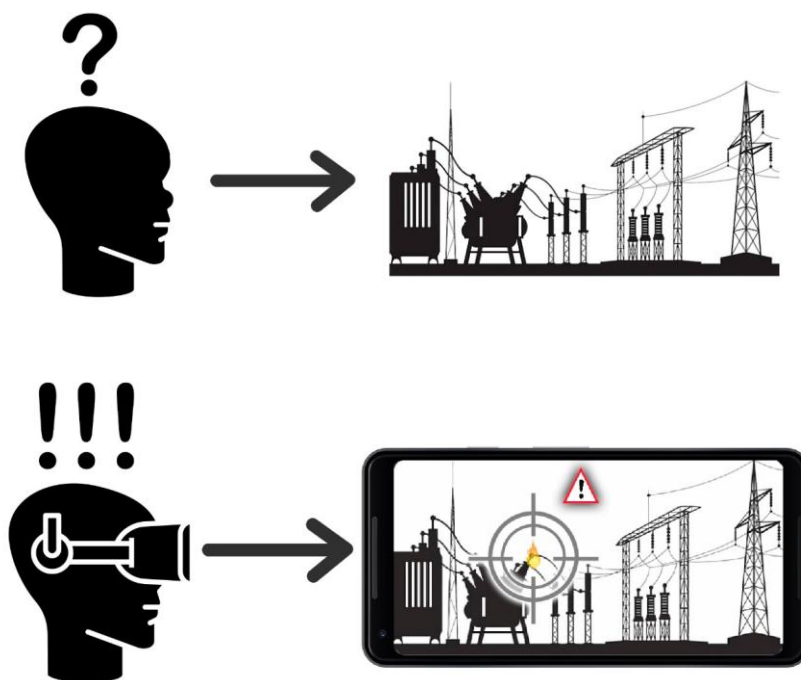


Рис. 2. Схема использования портативного устройства

Метод регистрации электрических полей высокой напряженности, основанный на электрооптическом эффекте, заключается в следующем. По изменению коэффициента отражения лазерного пучка от электрооптического датчика контроля напряженности электрического поля определяются локальные области с повышенной напряженностью этого поля (изменение коэффициента отражения пропорционально напряженности электрического поля). Также с помощью электрооптического датчика производится измерение градиентов электрического поля. Датчик предварительно градуируют в калиброванном переменном электрическом поле.

Блок-схема разработанного устройства бесконтактной дистанционной диагностики высоковольтных изоляторов показана на рис. 3. Устройство состоит из последовательно соединенных: лазерного излучателя 1, поляризационного дискриминатора 2, волоконного световода 3, фотоприемника 5, узкополосного усилителя и компаратора 6, персонального компьютера (или ноутбука) 7, а также электрооптического датчика 4, соединенного с волоконным световодом 3 и фотоприемником 5. Главный измерительный элемент устройства – электрооптический датчик 4 – имеет возможность размещения непосредственно в высоком переменном электрическом поле и выполнен без использования металлических элементов. Волоконный световод также защищен от воздействия электрического поля. Электрооптический датчик 4 представляет собой не что иное, как сегнетоэлектрический кристалл, на поверхности которого сформирована периодическая доменная структура (ПДС). Для повышения чувствительности и разрешающей способности при локации градиентов напряженности поля используются резонансные свойства ПДС для данной длины волны лазерного излучателя 1 [15]. В ходе экспериментальных измерений для всех диагностируемых высоковольтных изоляторов определяют средние значения напряженности переменных электрических полей, соответствующие рабочему высокому напряжению. Также определяют предельные границы градиентов напряженности электрических полей, при которых еще не происходит электрический пробой или перекрытие изоляторов.

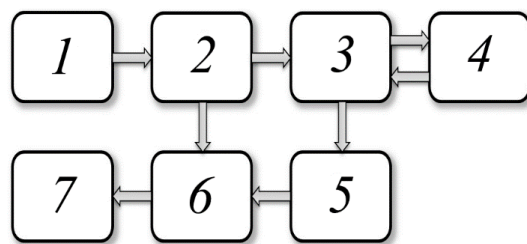


Рис. 3. Блок-схема устройства: 1 – лазерный излучатель; 2 – поляризационный дискриминатор; 3 – волоконный световод; 4 – электрооптический датчик; 5 – фотоприемник; 6 – узкополосный усилитель и компаратор; 7 – персональный компьютер

Для сканирования поверхности высоковольтных изоляторов электрооптический датчик 4 размещают на диэлектрической штанге и соединяют через поляризационный дискриминатор 2 и волоконный световод 3 с лазерным излучателем 1, а также с фотоприемником 5. Датчик приближают к изолятору и проводят сканирование поверхности. Оператор при этом находится на безопасном расстоянии от высоковольтного изолятора и касается только диэлектрической штанги. Полученные данные регистрируются с помощью специально разработанного программного обеспечения, которое записывает пространственное положение электрооптического датчика относительно поверхности изолятора и соответствующую данной точке напряженность электрического поля. Также компьютерная программа производит измерение нормальных и тангенциальных компонент градиентов напряженности электрического поля. Далее пространственное распределение повышенных, нормальных и тангенциальных к поверхности градиентов напряженности электрического поля сравнивается с ранее сохраненными эталонными значениями напряженности для полностью исправного высоковольтного изолятора. Общая схема измерений градиентов электрического поля показана на рис. 4.

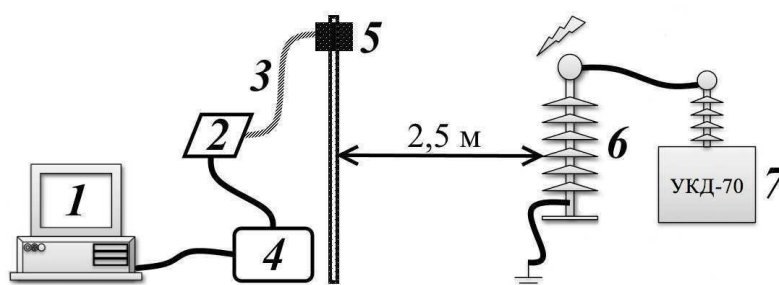


Рис. 4. Общая схема измерений градиентов электрического поля: 1 – персональный компьютер; 2 – лазерный излучатель и поляризационный дискриминатор; 3 – волоконный световод; 4 – блок управления, включающий фотоприемник и узкополосный усилитель с компаратором; 5 – электрооптический датчик, размещенный на диэлектрической штанге; 6 – высоковольтный изолятор; 7 – установка для испытания диэлектриков УКД-70

Основные результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим процесс регистрации ЧР электромагнитным и акустическим методом подробнее. На рис. 5 показана блок-схема измерительного устройства.

Измерительная ячейка установлена рядом с объектом исследования – высоковольтным изолятором (поз.1 на рис. 5). Данные диагностики с ИЯ (поз. 2 на рис. 5) передаются по радиоканалу на диспетчерский пункт. К ПК, установленному на диспетчерском пункте, по интерфейсу *USB* подключен модуль БСАП, который принимает поступающие по радиоканалу данные с измерительной ячейки (поз. 2 на рис. 5). Надёжная связь между соседними устройствами может осуществляться на расстоянии до 1000 метров при расположении соседних устройств в пределах прямой видимости, что может быть использовано в случае выхода из строя одного или нескольких устройств, так как есть возможность передавать информацию, минуя неисправные звенья.

Схема измерительной ячейки показана на рис. 6. Измерительная ячейка оборудована электромагнитной и ультразвуковой антеннами с соответствующими приемниками. АЦП соединен с модулем БСАП по интерфейсам *I2C*, *SPI* или *UART/USART*. Модуль БСАП передает получаемые данные на диспетчерский пункт по

радиоканалу 2,4 ГГц.

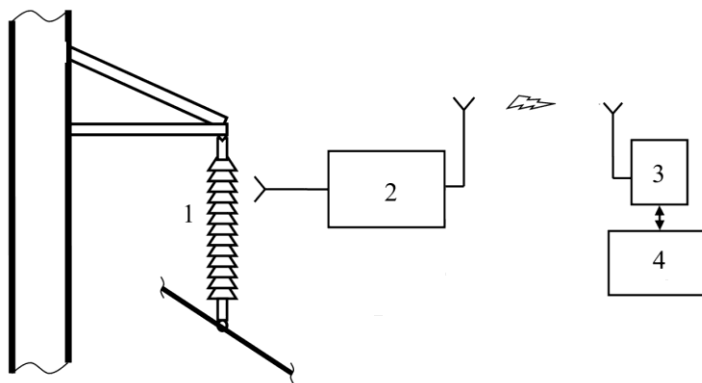


Рис. 5. Блок-схема измерительного устройства: 1– высоковольтный изолятор; 2 – измерительная ячейка; 3 – модуль БСАП с интерфейсом USB; 4 – персональный компьютер

На ПК происходит сбор информации, ее запись и последующая обработка информации об амплитуде, частоте повторения и фазе сигналов с помощью разработанной программы способом бесконтактной диагностики высоковольтных полимерных изоляторов. Накопление сигналов по узким фазовым интервалам (порядка 20 град.) происходит в течение 18 с, вполне удовлетворяет стохастическому характеру возникновения ЧР.

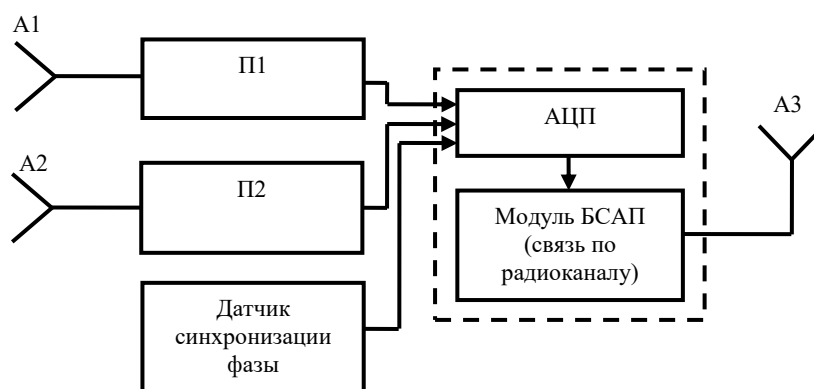


Рис. 6. Схема измерительной ячейки: А1 – антенна для приема ультразвуковых импульсов; А2 – антенна для приема электромагнитных импульсов; А3 – антенна для передачи измерительной информации по радиоканалу; П1 – приемник ультразвука; П2 – приемник электромагнитного излучения; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Процесс обработки сигналов ЧР заканчивается построением следующих характеристик: амплитуд и числа импульсов в каждом фазовом интервале и распределения числа импульсов по амплитудам.

Полученное фазовое распределение параметров импульсов сравнивается с ранее записанным распределением параметров импульсных сигналов для (бездефектного) ВИ того же типа. Поскольку скорости распространения электромагнитных и акустических импульсов отличаются на несколько порядков, то для их синхронизации с каждым конкретным фазовым интервалом используется блок фазовой синхронизации, учитывающий расстояние между дефектом и датчиками.

Метод регистрации электрических полей высокой напряженности основан на электрооптическом эффекте. Физический принцип работы электрооптического датчика основан на эффекте изменения показателя преломления лазерного пучка, проходящего через периодическую доменную структуру, находящуюся в электрическом поле с напряженностью E . Этот эффект носит название «линейный электрооптический эффект» или «эффект Поккельса». Условие максимального отражения (или прохождения) лазерной волны с длиной λ_0 от ПДС выполняется при равенстве:

$$\lambda_0 = 2nD \text{ (отраж.)}, \quad (1)$$

$$\lambda = (2n + 1)D \text{ (прелом.)}, \quad (2)$$

где n – показатель преломления; D – период ПДС.

Сдвиг резонансной частоты ПДС соответствует изменению резонансной длины волны:

$$\lambda_m = (\lambda_0 - \lambda_E) = n^3 r D E, \quad (3)$$

где r – электрооптический коэффициент; λ_E – длина волны в приложенном электрическом поле.

Таким образом, максимальный коэффициент отражения R лазерной волны от ПДС убывает с увеличением резонансной длины волны.

Изменение коэффициента отражения R можно представить в виде

$$\Delta R = (dR/dE)E. \quad (4)$$

Из этого выражения следует:

$$E = \lambda m (n^3 r D) - 1, \quad (5)$$

а значит

$$dR/dE = (dR/d\lambda_m) n^3 r D. \quad (6)$$

Для наглядности на рис. 7 показан график зависимости значения коэффициента отражения R от изменения резонансной длины волны. Если длину волны лазерного излучения λ_m настроить на середину склона спектральной кривой отражения, соответствующей значению $R_{\max}/2$, то переменное электрическое поле будет создавать соответствующее изменение коэффициента отражения (ΔR). Использование практически линейного отрезка $dR/d\lambda_m$ позволяет в линейном масштабе определять значения поля E .

Используя предложенный метод дистанционного бесконтактного измерения напряженности электрического поля, нами была выполнена диагностика состояния группы реальных высоковольтных полимерных изоляторов ЛК70/35. Эксперименты проводились на стенде кафедры «Промышленная электроника и светотехника» Казанского государственного энергетического университета. Состояние изоляторов проверялось путем сканирования электрооптическим датчиком вдоль стержня изолятора на расстоянии 2,5 м.

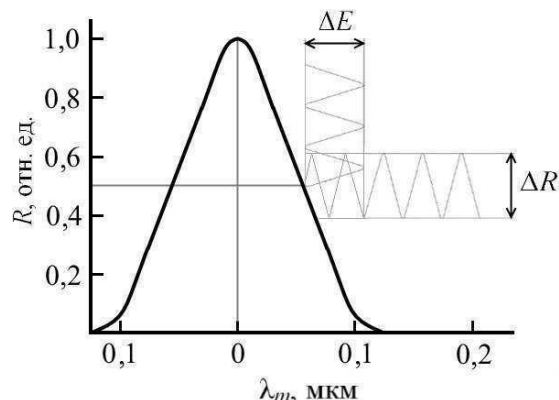


Рис. 7. Зависимость значения коэффициента отражения R от изменения резонансной длины волны

В ходе экспериментов были выявлены несколько дефектных изоляторов с поврежденным контактом стержень–электрод, а также ряд изоляторов, находящихся в преддефектном состоянии. На рис. 8 показано распределение напряженности электрического поля вдоль образца для дефектного (а) и бездефектного (б) полимерных изоляторов типа ЛК70/35. Небольшое увеличение E вблизи оконцевателей обоих образцов можно объяснить отсутствием специальных экранов для выравнивания поля по всей длине.

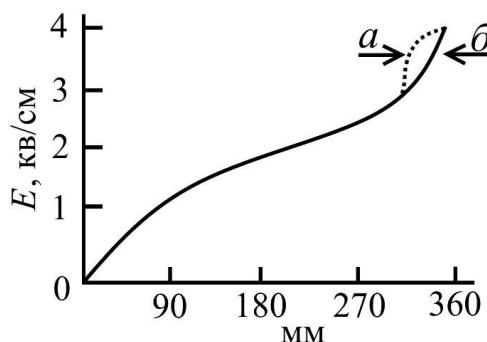


Рис. 8. Распределение напряженности поля между оконцевателями дефектного (а) и бездефектного (б) изоляторов. Изменение поля на дефекте изображено пунктиром

Выводы

Разработан комплекс методов дистанционной диагностики рабочего состояния высоковольтных изоляторов. Он основан на регистрации, передаче и последующей компьютерной обработке сигналов частичных разрядов, детектированных электромагнитным, акустическим и электрооптическим датчиками. В дополнение к ним используется визуальный контроль и поиск неисправностей высоковольтного оборудования на объектах энергетики. Таким образом, можно утверждать, что представленный комплекс, включающий бесконтактную дистанционную диагностику состояния высоковольтных изоляторов с использованием фотонного кристалла в качестве электрооптического датчика, позволяет определять момент возникновения преддефектного состояния изоляторов за счет выявления областей с повышенной напряженностью электрического поля. Измерение градиентов напряженности электрического поля в этих областях позволяет определять возможное место образования дефектов в процессе эксплуатации. Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты подтверждают возможность промышленной применимости предложенного способа бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов, находящихся под рабочим напряжением.

Литература

1. Yi Hu, Kai Liu Inspection and Monitoring Technologies of Transmission Lines with Remote Sensing // Academic Press. 2017. pp. 281-508.
2. R. Bartnikas Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018; V. 9, № 5, pp. 763-808.
3. Славинский А.З., Устинов В.Н. Обзор по направлению «Материалы и разработка новых методов испытаний и средств диагностики» // Энергия единой сети. 2016. №4. С. 6–11.
4. Rodrigo Mor, L.C. Castro Heredia, D.A. Harmsen, F.A. Muñoz, A new design of a test platform for testing multiple partial discharge sources, International Journal of Electrical Power & Energy Systems. V. 94. pp. 374-384, 2018.
5. Симановский И.В. Индикатор пробоя полимерного изолятора // Электротехника. 2013. №6. С. 21–24.
6. Хохлов А.В., Воркунов О.В., Афанасьева Т.И. Анализ современных методов и средств диагностики изоляторов воздушной линии электропередачи // Вестник современных исследований. 2018. Т. 20, № 5-3. С. 545–547.
7. Гимадиев Р.А., Ившин И.В., Мухортов И.С., Билалов Ф.Ф., Валиуллин Р.Р., Мифтахова Н.К. Эффективность методики оценки результатов контроля технического состояния кабельных линий среднего напряжения // Энергетика Татарстана. 2016. №2. С. 68–71.
8. Runde D., Brunken S., Ruter C., Kip D. Integrated optical electric field sensor based on a Bragg grating in lithium niobate // Appl. Phys. B. 2007. V. 86. N.1. pp. 91-95.
9. Воротницкий В.Э., Дмитриев И.Н., Млотов А.В., Демин А.Н. Диагностика механического состояния опорно-стержневой фарфоровой изоляции высоковольтных разъединителей в условиях эксплуатации // Энергия единой сети. 2014. №2. С. 2–14.
10. Свистунов Н.А. Анализ методов диагностики технического состояния электротехнических устройств, основанных на обнаружении и измерении уровня частичных разрядов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. №12. С. 100–102.
11. Ivanov D.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F. Portable complex for remote control of high-voltage insulators using wireless data collection and transmission module // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V.13. N. 6. pp. 2358-2362.

12. Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F., Konov A.B., Ivanov D.A. Goryachev M.P. Methodology of ice coating monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. V. 12. N. 22. pp. 6479-6482.

13. Балобанов Р.Н., Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Маргулис С.М. Устройство оптической индикации дефекта высоковольтной изолирующей конструкции // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2017. №3-4. С. 119–125.

14. Степанов В.М., Судаев А.С. Дефекты в изоляции электротехнических устройств, приводящие к появлению частичных разрядов // *Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки*. 2018. №6. С. 386–391.

15. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Kalimullin R.I., Mardanov G.D., Potapov A.A. Ultrasonic tunable transducer on domain structures // *Ferroelectrics*. 2012. V.441. N.1. pp. 25-29.

Авторы публикации

Голенищев-Кутузов Александр Вадимович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: alex.kutuzov@mail.ru.

Иванов Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Потапов Андрей Александрович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Кротов Владимир Иванович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Yi Hu, Kai Liu Inspection and Monitoring Technologies of Transmission Lines with Remote Sensing *Academic Press*. 2017; 281-508. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812644-8.00005-9>.

2. Bartnikas R. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018; 9(5):763-808. doi: 10.1109/TDEI.2002.1038663.

3. Slavinsky AZ., Ustinov V.N. Review in "Materials and development of new test methods and diagnostic tools" *Unified Energy Network*. 2016;4:6-11.

4. Rodrigo Mor, L.C. Castro Heredia, D.A. Harmsen, F.A. Muñoz, A new design of a test platform for testing multiple partial discharge sources. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018;94:374-384.

5. Simanovski IV. Polymer insulator breakdown Indicator *Electrical Equipment*. 2013;6:21-24

6. Hohlov AV., Vorkunov OV., Afanasyeva TI. Analysis of modern methods and tools for the diagnosis of overhead transmission line insulator. *Bulletin of modern research*. 2018; 20(5-3):545-547.

7. Gimadiev RA., Ivshin IV., Muhortov IS., Bilalov FF., Valiullin RR., Miftahova N. The effectiveness of methodology for assessing the results of the medium-voltage cable lines technical state monitoring. *Energy Tatarstan*. 2016; 2: 68-71.

8. Runde D., Brunken S., Ruter C., Kip D. Integrated optical electric field sensor based on a Bragg grating in lithium niobate *Applied Physics*. 2007;86 (1):91-95.

9. Vorotnitsky VE., Dmitriev IN., Mlotok AV., Demin AN. Diagnostics of mechanical condition of the locomotive-Rod high voltage isolation porcelain disconnectors in operation. *Unified Energy Network*. 2014;2:2-14.

10. Svistunov NA. Analysis of diagnostics methods of technical condition of electrotechnical devices, based on detection and measurement of the level of partial discharges. *Izvestiya TulGU Technical science*. 2018;12:100-102.

11. Ivanov DA., Golenishchev-Kutuzov AV., Yaroslavsky DA., Sadykov MF. Portable complex for remote control of high-voltage insulators using wireless data collection and transmission module. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(6):2358-2362.

12. Yaroslavsky DA., Konov MF., Ivanov AB., Goryachev DA. Methodology of ice coating

monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;12(22): 6479-6482.

13. Balaban RN., Zaripov DK., Nasibullin RA., Margulies SM. Optical indication of the defect of high voltage insulation design. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017; 3-4:119-125.

14. Stepanov VM., Sudavnyj AS. Defects in the insulation of electrical devices, leading to the appearance of partial discharges. *Proceedings of Tula State University. Technical science*. 2018;6:386-391.

15. Golenishchev-Kutuzov AV., Golenishchev-Kutuzov VA., Kalimullin RI., Mardanov GD., Potapov AA. Ultrasonic tunable transducer on domain structures. *Ferroelectrics*. 2012; 441(1):25-29.

Authors of the publication

Alexandr V. Golenishchev-Kutuzov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Dmtriy A. Ivanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey A. Potapov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vladimir I. Krotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

27 мая 2019 г.