

ЭНЕРGETИКА

ГАЙНУЛЛИНА Л.Р., ТУТУБАЛИНА В.П. Исследование окисления дибутилсульфида концентрированным раствором пероксида водорода при помощи термограмм.	3
ТАЙМАРОВ М.А., ИЛЬИН В.К., ОСИПОВ А.Л., ДОЛГОВА А.Н., АХМЕРОВ А.В. Теплонасосный комплекс для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов.	8
САЙФУЛЛИН Э.Р., ЛАРИОНОВ В.М., ВАНЬКОВ Ю.В. Численное моделирование стабилизации теплопроизводительности парового котла при сжигании попутного нефтяного газа.	17
ФАРАХОВ Т.М., ЛАПТЕВ А.Г. Определение локальных коэффициентов теплоотдачи на начальном участке обтекаемых тел.	25
СТЕПАНОВ В.С., СТЕПАНОВА Т.Б., СТАРИКОВА Н.В. Определение энергетического потенциала сжатого воздуха для оценки эффективности работы воздушно-аккумулирующей электростанции.	31
АЛИ Я.С.С., ЧИЧИРОВА Н.Д. Электроэнергетическая система Йемена, ее состав и характеристики.	43
САЛУМ А.А., МАКСИМОВ В.И. Работа водяного теплового насоса в условиях образования льда на поверхности трубки испарителя.	49
НИЗАМИЕВ М.Ф., ВЛАДИМИРОВ О.В., ИВШИН И.В., ЦВЕТКОВ А.Н., УСМАНОВ И.К., ГИБАДУЛЛИН Р.Р. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей напряжением до 1000 В.	58
МАЛАФЕЕВ А.В., ЮЛДАШЕВА А.И. Выбор вариантов реконструкции системы электроснабжения на основе теории нечетких множеств и критериев теории принятия решений.	67
БАРТОЛОМЕЙ П.И., СЕМЕНКО С.И. Развитие метода оценивания состояния для интеграции СВИ и измерений SCADA в ЭЭС.	77
НГУЕН Д.Т., ФАМ Д.Н., МИНГАЛЕЕВА Г.Р. Оценка показателей эффективности паротурбинных мини-ТЭС, работающих на угле.	89
ФЕДОТОВ А.И., АБДУЛЛАЗНОВ Р.Э., МУДАРИСОВ Р.М. Методики оценки устойчивости синхронных двигателей при трехфазных коротких замыканиях в системе внешнего электроснабжения.	102
ШАБУРОВ Е.Л., ДЕРЕВЯНКО О.В., ФЕДЮХИН А.В., СМЯТСКАЯ Ю.А., ПОЛИТАЕВА Н.А. Определение теплотворной способности отработанных сорбентов из остаточной биомассы <i>Chlorella sorokiniana</i> и ряски <i>Lemna minor</i>	113

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

САВЕНКО А.Е., САВЕНКО С.Е., САВЕНКО П.С. Исследование причин и параметров синфазных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах.	122
---	-----

ФИЗИКА

СОЛОВЬЕВ И.А., КАРТАШОВ Э.М. Стохастическая постановка задачи Стефана в гиперболическом представлении.	132
---	-----

POWER ENGINEERING

GAYNULLINA L.R., TUTUBALINA V.P. Dibutylsulfide oxidation research the concentrated hydrogen peroxide solution by means of thermograms	3
TAIMAROV M.A., ILYIN V.K., OSIPOV A.L. , DOLGOVA A.N., AKHMEROV A.V. Heat pumps complex for recycling of secondary energy resources of petrochemical plants.	8
SAIFULLIN E.R., LARIONOV V.M., VANKOV YU.V. Numerical modeling of stabilization of the heat output of a steam boiler in the combustion of associated petroleum gas.	17
FARAKHOV T.M., LAPTEV A.G. Determination of local heat transfer coefficients at the entrance region of streamlined bodies.	25
STEPANOV V.S., STEPANOVA T.B., STARIKOVA N.V. Evaluaation the energy potential of compressed air for determining efficiency of air-accumulating electric	31
ALI Y.S.S., CHICHIROVA N.D. Electric power system of Yemen, its structure and characteristics.	43
MAKSIMOV V.I. , SALOUM A. The water heat pump operation under frost conditions on the evaporator surface.	49
VLADIMIROV O.V., IVSHIN I.V., NIZAMIEV M.F., TSVETKOV A.N., USMANOV I.K., GIBADULLIN R.R. Stand for after repair tests of asynchronous motors with voltage up to 1000 V. . .	58
MALAFEEV A.V., IULDASHEVA A.I. Selection of options for the reconstruction of the power supply system based on the fuzzy sets theory and the criteria of decision-making theory	67
BARTOLOMEY P.I., SEMENENKO S.I.State estimation method development for scada and synchronized phasor measurements within power system.	77
NGUYEN D.T., FAM D.N., MINGALEEVA G.R. Assessment of indicators of efficiency of the steam-turbine mini-thermal power plants burning coal.	89
FEDOTOV A.I., ABDULLAZYANOV R.E., MUDARISOV R.M. Synchronous motors stability estimation methodologies under three-phase faults in power supply grids.	102
SHABUROV E.L. , DEREVIANKO O.V., FEDYUKHIN A.V., SMYATSKAYA YU.A., POLITAEVA N.A. Determination of thermal capacity of processed sorbents from residual biomass of Chlorella Sorokiniana and duckweed Lemna Minor.	113

ELECTRICAL ENGINEERING

SAVENKO A.E., SAVENKO S.E., SAVENKO P.S. Study of the reasons and parameters of common-mode fluctuations of power in autonomous electrical complexes.	122
--	-----

PHYSICS

KARTASHOV E.M., SOLOVIEV I.A. The stochastic formulation of the Stephan's roblem in hyperbolic representation.	132
---	-----



УДК 66-92

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛЕНИЯ ДИБУТИЛСУЛЬФИДА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМ РАСТВОРОМ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА ПРИ ПОМОЩИ ТЕРМОГРАММ

Л.Р. Гайнуллина, В.П. Тутубалина

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
gainullina7819@mail.ru

Резюме: С использованием термографического метода изучена реакция окисления дибутилсульфида в *n*-октане концентрированным 95,6 %-ным раствором пероксида водорода в реакторе смешения с пропеллерной мешалкой.

Установлено, что окисление дибутилсульфида пероксидом водорода в эквимольном соотношении 1:1 при температуре 80 °С протекает до образования дибутилсульфоксида, а при соотношении 1:2 и при температуре 100 °С – до дибутилсульфона.

Повышение количества пероксида водорода и температуры сопровождается образованием кислых продуктов – сульфониевых и сульфоновых кислот.

Методом газожидкостной хроматографии доказано, что при окислении дибутилсульфида пероксидом водорода не происходит его деструкции.

Ключевые слова: трансформаторное масло, дибутилсульфид, окисление, пероксид водорода, термограмма.

DIBUTYLSULFIDE OXIDATION RESEARCH THE CONCENTRATED HYDROGEN PEROXIDE SOLUTION BY MEANS OF THERMOGRAMS

L.R. Gaynullina, V.P. Tutubalina

Kazan State Power Engineering University
gainullina7819@mail.ru

Abstract: With the using of a thermographic method reaction of oxidation of dibutylsulfide in a *n*-octane 95,6 % concentrated solution of hydrogen peroxide in the mixture reactor with the propeller mixer is studied.

It is established that dibutylsulfide oxidation by hydrogen peroxide in an ekvimoly-arny ratio 1:1 at a temperature of 80 °C proceeds before formation of a dibutylsulfoksid, and at a ratio 1:2 and at a temperature of 100 °C – to a dibutylsulfon.

The increase in amount of hydrogen peroxide and temperature is followed by for-mation of sour products – the sulfoniyevykh and sulfonew acids.

By method of a gas-liquid chromatography it is proved that during oxidation of dibutylsulfide by hydrogen peroxide his destruction doesn't happen.

Keywords: transformer oil, dibutylsulfide, oxidation, hydrogen peroxide, thermogram.

For citation: Gaynullina L.R., Tutubalina V.P. Dibutylsulfide oxidation research the concentrated hydrogen peroxide solution by means of thermograms. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):3-6. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-3-6.

Введение

В настоящее время в области химии двухвалентных соединений серы получены новые вещества, обладающие уникальными свойствами. Известно, что сераорганические соединения нашли широкое применение в качестве ингибиторов окислительного превращения углеводородов масляных фракций $T_{кип} = 300-400$ °С и трансформаторных масел, улучшая их физико-химические и эксплуатационные характеристики [1, 2].

Внимание исследователей привлекают органические сульфоксиды и сульфоны, которые образуются при термических и окислительных превращениях сераорганических соединений [3–8].

Сульфиды и окисленные сераорганические соединения ингибируют окисление углеводородов масла, повышая их термическую стабильность, благодаря способности разрушать гидропероксиды, стимулирующие автоокисление углеводородов в цепном окислительном процессе [1].

Экспериментальная часть

Исследование посвящено изучению характера взаимодействия индивидуального сульфида (дибутилсульфида) с пероксидом водорода. Для установления механизма протекания реакции окислительного превращения дибутилсульфида необходимо иметь достоверную информацию о продуктах, образующихся в процессе окисления дибутилсульфида пероксидом водорода. С целью определения продуктов реакции и влияния температуры на протекание реакции были использованы метод хроматографического анализа и термографические исследования. Концентрация дибутилсульфида в пересчете на общую серу составляла 0,5 % и во всех опытах оставалась постоянной для получения сопоставимых экспериментальных данных. Известно [1], что такая концентрация сульфидов является оптимальной.

Реакцию окисления дибутилсульфида пероксидом водорода проводили в среде *n*-октана, взятого в количестве 100 см³, в термостатированном аппарате смешения, снабженном пропеллерной мешалкой. Во всех опытах число оборотов механической мешалки составляло 800 об/мин, оптимальное при получении сульфоксидов и сульфонов.

В качестве окислителя был использован пероксид водорода 95,6 %-ной концентрации. Количество пероксида водорода в реакции окисления дибутилсульфида варьировали при соотношении дибутилсульфид : пероксид водорода в интервале 1:1, 1:2 и выше.

Известно [9], что при соотношении дибутилсульфид : пероксид водорода 1:1 образуются сульфоксиды, а при соотношении 1:2 – сульфоны.

Приготовление модельных смесей *n*-октан-дибутилсульфид и отбор из них проб осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 52714-2007.

Концентрацию общей серы в модельных смесях находили по ГОСТ Р 51859-2002. Концентрацию сульфидной и сульфоксидной серы находили по методике, описанной в литературе [10].

Концентрацию и состав продуктов, образовавшихся при окислительном превращении дибутилсульфида под действием пероксида водорода, исследовали при помощи хроматографа марки Кристаллюкс-4000 М, снабженного детектором по теплопроводности и имеющим чувствительность 1500 МВ·см³/мг. Газохроматографическая колонка была выполнена в виде спирали из нержавеющей стали с внутренним диаметром 3 мм, длиной 2,5 м. В качестве сорбента были использованы молекулярные сита NaX с

размером частиц 0,2–0,4 мм, а в качестве осушителя применяли силикагель марки КСМ №5, размер частиц которого составлял 0,4–0,8 мм (ГОСТ 3956-76). В качестве газа-носителя служил гелий (ТУ 51-689-75), кислород медицинский или технический (ГОСТ 5583-78). Редуктор для подачи кислорода – ДКП-1-65 (ТУ 26-05-463-76). Относительная ошибка при определении концентрации продуктов реакции не превышала 0,5 %.

С целью выявления последовательности превращения дибутилсульфида, при взаимодействии с пероксидом водорода, на термографе ТQ 170 были сняты термограммы реакций в температурном интервале 30–130 °С с погрешностью измерений ±1,0 °С. Термограммы показаны на рисунке.

Обсуждение результатов

Из экспериментальных данных, показанных на рисунке, видно, что при температурах 30, 40, 50 и 60 °С окисление дибутилсульфида пероксидом водорода практически не протекает. Реакции окисления протекают очень медленно без образования теплового эффекта,

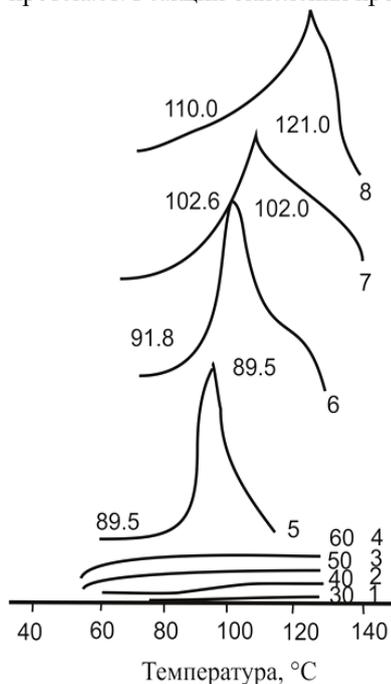


Рис. Термограммы взаимодействия дибутилсульфида с пероксидом водорода при температурах: 1, 2, 3, 4 – соответственно 30, 40, 50 и 60 °С; 5 – 80 °С; 6 – 100 °С; 7–120 °С; 8 – 130 °С.

Выход сульфоксида равен 98,7 %. При более высокой температуре и соотношении дибутилсульфид : пероксид водорода, равном 1:2, наблюдается образование дибутилсульфона с выходом 97,9 % (кривая 6).

С нарастанием температуры реакции и подаваемого количества пероксида водорода происходит окисление дибутилсульфида пероксидом водорода с образованием сульфоновых и сульфоновых кислот и сдвигом экзоэффекта в область повышенных температур (кривые 7 и 8).

Полученные экспериментальные данные показывают, что окисление дибутилсульфида пероксидом водорода только в температурном интервале 80–100 °С и при соотношении дибутилсульфид : пероксид водорода, равном 1:1 и 1:2, протекает с образованием сульфоксидов и сульфонов. Повышение температуры до 120 и 130 °С и количества пероксида водорода сопровождается образованием кислых продуктов, о чем свидетельствуют низкие значения рН реакционной массы: 5 и 6 соответственно. Экзоэффект реакции повышается, соответственно, на 19 и 16,4 °С.

о чем свидетельствует ход кривых 1, 2, 3 и 4.

Интенсивное взаимодействие дибутилсульфида с пероксидом водорода начинается при температуре 80 °С. На рисунке это выражено кривой 5, которая может быть охарактеризована узким и высоким экзоэффектом. Возникший экзоэффект характеризуется повышением температуры на 9,5 °С.

При повышении концентрации пероксида водорода в реакции окисления дибутилсульфида до соотношения дибутилсульфид : пероксид водорода, равного 1:2, наблюдается небольшой сдвиг экзоэффекта в область высоких температур (кривая 2). В этом случае пероксид водорода полностью расходуется на окисление дибутилсульфида до соответствующего сульфона. При этом экзоэффект реакции составляет 12,5 °С (кривая 5).

Анализ образовавшихся продуктов реакции окисления дибутилсульфида концентрированным раствором пероксида водорода показал, что при соотношении дибутилсульфид : пероксид водорода 1:1 до температуры 89,5 °С окисление протекает с преимущественным образованием сульфоксида.

Поэтому окисление дибутилсульфида пероксидом водорода можно представить в виде следующей схемы:



В соответствии с предложенной схемой реакция окисления дибутилсульфида концентрированным раствором пероксида водорода, при высоких температурах и повышенных количествах пероксида водорода, может протекать с образованием кислых соединений.

Согласно термограмме, показанной на рисунке, окисление дибутилсульфида пероксидом водорода протекает без деструкции его молекулы. Варьируя значениями температуры и количеством пероксида водорода, реакцию окисления дибутилсульфида можно целенаправленно обратить в сторону образования сульфоксидов и сульфонов.

Анализ реакционных смесей методом газожидкостной хроматографии показал, что основным продуктом реакции окисления дибутилсульфида пероксидом водорода является вода. Разложение дибутилсульфида не обнаружено, поскольку не замечено было выделение газов, в том числе сероводорода.

Таким образом, окисление дибутилсульфида концентрированным 95,6 %-ным раствором пероксида водорода при соотношениях дибутилсульфид : пероксид водорода, соответственно равных 1:1 и 1:2, и температурах 80 и 100 °С целенаправленно протекают с образованием дибутилсульфоксида и дибутилсульфона.

Выводы

1. Показано, что увеличение количества пероксида водорода, подаваемого в реакционную систему свыше соотношения дибутилсульфид–пероксид водорода 1:2, влечет сдвиг экзоэффекта в область высоких температур, и образование кислых продуктов.

2. Методом газожидкостной хроматографии было доказано, что в процессе окисления дибутилсульфида пероксидом водорода не происходит деструкция дибутилсульфида и основными продуктами реакции являются сульфоксиды, сульфоны и вода.

Литература

1. Харлампида Х.Э., Гайнуллина Л.Р., Тутубалина В.П. Индивидуальные сернистые соединения – ингибиторы окисления углеводородов трансформаторного масла // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т.19, №7. С. 5–7.
2. Гайнуллина Л.Р., Тутубалина В.П., Харлампида Х.Э. Сераорганические соединения масляной фракции арланской нефти // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20, №10. С.67–69.
3. Bruzzoniti M.C., De Carlo R.M., Sarzanini C., Maina R., Tumiatti V. Stability and Reactivity of Sulfur Compounds against Copper in Insulating Mineral Oil: Definition of a Corrosiveness Ranking // Ind. Eng. Chem. Res. 2014. 53 (21). P 8675–8684. DOI: 10.1021/ie4032814.
4. Мазгаров А.М. Сернистые соединения углеводородного сырья / А.М. Мазгаров, О.М. Корнетова. Казань: Казан. ун-т, 2015. 36 с.
5. Singh D., Chopra A., Mahendra P. K., Kagdiyal V., Saxena D. Sulfur compounds in the fuel range fractions from different crude oils // Petroleum Science and Technology. V. 34. 2016.
6. Arystanbekova S.A., Lapina M.S., Volynskii A.B. Determination of individual sulfur-containing compounds in liquid hydrocarbon raw materials and their processing products by gas chromatography // Journal of Analytical Chemistry. May 2017, Vo. 72, Issue 5. P 473–489.
7. Кривцов Е.Б., Головкин А.К. Кинетика окисления сернистых соединений дизельной фракции нефти озono-кислородной смесью // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321, № 3. С.157–161.
8. Зарифьянова М.З., Вафина С.Д., Валиуллина Р.Р., Аристов И.В., Константинова А.В., Харлампида Х.Э. Кинетика окисления сульфидов дизельной фракции в присутствии ледяной

уксусной кислоты // Вестник Казанского технологического университета. 2012. V.15, N.9. P.196–198.

9. Караулова Е.Н. Химия сульфидов нефти. М.: АН СССР, 1970. 136 с.

10. Методы анализа органических соединений нефти, их смесей и производных / Под ред. Г.Д. Гальперна. М.: Наука, 1969. 210 с.

Авторы публикации

Гайнуллина Лейсан Раисовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» Казанского государственного энергетического университета.

Тутубалина Валерия Павловна – д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Harlampidi H.E., Gaynullina L.R., Tutubalina V. P. Individual sulphurous connections – inhibitors of hydrocarbons' oxidation of transformer oil //Messenger of the Kazan technological university. 2016. V.19, N. 7. P. 5–7.

2. Gaynullina L.R., Tutubalina V.P., Harlampidi H.E. Organosulfur connections of oil fraction of arlansky oil//Bulletin of the Kazan technological university. 2017. V. 20, N. 10. P. 67–69.

3. Bruzzoniti M.C., De Carlo R.M., Sarzanini C., Maina R., Tumiatti V. Stability and Reactivity of Sulfur Compounds against Copper in Insulating Mineral Oil: Definition of a Corrosiveness Ranking // Ind. Eng. Chem. Res. 2014. 53 (21). P. 8675–8684. DOI: 10.1021/ie4032814.

4. Mazgarov A.M. Sulphurous compounds of hydrocarbonic raw materials / A.M. Mazgarov, O.M. Kornetova. Kazan: Cauldron. un-t, 2015. 36 p.

5. Singh D., Chopra A., Mahendra P. K., Kagdiyal V., Saxena D. Sulfur compounds in the fuel range fractions from different crude oils // Petroleum Science and Technology. V. 34. 2016.

6. Arystanbekova S.A., Lapina M.S., Volynskii A.B. Determination of individual sulfur-containing compounds in liquid hydrocarbon raw materials and their processing products by gas chromatography // Journal of Analytical Chemistry. May 2017. Vo. 72, Issue 5. P. 473–489.

7. Krivtsov E.B., Golovko A.K. Kinetics of diesel fraction's sulphides' oxidation with the presence ozono-oxygen mix//News of the Tomsk Polytechnic University. 2012. V. 321, N 3. P. 157–161.

8. Zarifyanova M.Z., Vafina S.D., Valiullina R.R., Aristov I.V., Konstantinova A.V., Harlampidi H.E. Kinetics of oxidation of diesel fraction's sulfides in the presence of ice acetic acid//the Bulletin of the Kazan technological university. 2012. V.15, N 9. P. 196–198.

9. Karaulova E.N. Chemistry of oil's sulfides. M.: Academy of Sciences of the USSR, 1970. 136 p.

10. Methods of the analysis of oil's organic compounds, their mixes and derivatives / Under the editorship of G.D. Galpern. M.: Science, 1969. 210 p.

Authors of the publication

Leysan R. Gaynullina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: gainullina7819@mail.ru.

Valeria P. Tutubalina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

18 февраля 2019 г.



УДК 621.575.9

ТЕПЛОНАСОСНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ

М.А. Таймаров¹, В.К. Ильин¹, А.Л. Осипов¹, А.Н. Долгова^{1,2}, А.В. Ахмеров¹
¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
²Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Резюме: Созданный теплонасосный комплекс позволяет утилизировать одновременно различные виды вторичных энергоресурсов нефтехимических производств. Основным потенциалом по используемым ресурсам для разработанного теплонасосного комплекса служит теплота горючих сбросных газов и теплота оборотной воды, а конечными получаемыми энергоресурсами являются теплота теплофикационной воды с температурой 150 °С и электроэнергия для внутреннего и внешнего потребления.

Ключевые слова: теплонасосный комплекс, вторичный энергоресурс, тепловой насос, энергопотенциал, теплота.

HEAT PUMPS COMPLEX FOR RECYCLING OF SECONDARY ENERGY RESOURCES OF PETROCHEMICAL PLANTS

M.A. Taimarov¹, V.K. Ilyin¹, A.L. Osipov¹, A.N. Dolgova^{1,2}, A.V. Akhmerov¹
¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
²Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract: The created heat pump complex allows to utilize simultaneously different types of secondary energy resources of petrochemical industries. The main potential for the resources used for the developed heat pump complex is the heat of flammable waste gases and heat of circulating water, and the final received energy resources are heat of heating water with a temperature of 150 °C and electricity for internal and external consumption.

Keywords: heat pump complex, secondary energy resource, heat pump, energy potential, heat.

For citation: Taimarov M.A., Ilyin V.K., Osipov A.L., Dolgova A.N., Akhmerov A.V. Heat pumps complex for recycling of secondary energy resources of petrochemical plants. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019;21(3-4):7-14. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-7-14.

Постановка задачи исследования

При глубокой переработке нефтехимического сырья образуется много побочных вторичных энергетических ресурсов в виде теплоты сбросной воды очистных сооружений, циркуляционной воды градирен, теплоты спутниковой воды, невозвратного конденсата. Значительная часть вторичных энергетических ресурсов образуется в виде углеводородных горючих соединений в виде сбросного и топливного газа, метано-водородной фракции, тяжелых смол, поддимерной воды, «желтого» масла и коксового остатка после установок замедленного коксования [1–5].

По данным ПАО «Нижнекамскнефтехим» за 2016 г. неиспользуемые горючие отходы в виде «желтого» масла составили 600 т/год, в виде жидкого горючего сорбента А-2 – 2 т/час, в виде теплоты сбросной воды с температурой 27 °С по очистным сооружениям – 50000 м³/час [6–7].

В ПАО «Казаньоргсинтез» по данным 2016 г. объемы тепловых вторичных ресурсов, сосредоточенные в оборотной воде градирен с температурой 25 °С, составили 5000 м³/час, в виде горючих отходов смол пиролиза – 400 т/год, в виде сбросных горючих газов – 150 м³/час.

В ПАО "Нижнекамскнефтехим" и ПАО "Казаньоргсинтез" целевой показатель сжигания сбросных газов на факелах и свечах за 2017 г. составил 5 % от объема всего используемого в технологии газообразного углеводородного сырья.

В АО «ТАНЕКО» по данным на 2017 г. вводимая установка замедленного коксования с мощностью по сырью составит 2 млн. т в год. Наряду с основными товарными продуктами: кислый газ, нестабильный бензин, легкий и тяжелый газойль производится побочный вторичный горючий продукт – нефтяной кокс в количестве 700 тыс.т/год [8–10].

Из представленного анализа видно, что вторичные энергоресурсы нефтехимии содержат топливную составляющую в виде жидких, газообразных, твердых горючих отходов и тепловую в виде теплоты оборотной воды градирен и теплоты сбросной воды очистных сооружений.

Поэтому разработка технологии и установки комплексного использования вторичных энергетических ресурсов является основным направлением исследования потенциала энергосбережения нефтехимических предприятий.

В данной статье рассматривается применение газотурбинных и теплонасосных установок для создания модуля универсального комплекса по утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов.

Определение мощности и параметров работы универсального теплонасосного комплекса по утилизации вторичных горючих и вторичных тепловых энергоресурсов

Теплоэнергетические характеристики вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теплоэнергетические характеристики вторичных энергоресурсов нефтехимических производств

Наименование энергоресурса	Теплота сгорания Q_n^p		Энтальпия, кДж/кг	Средний энергопотенциал ресурса, МВт
	кДж/кг	кДж/м ³		
Оборотная вода градирен при 25 °С	-	-	105	15
Сбросная вода очистных сооружений при 27 °С	-	-	114	30
Невозвратный конденсат при 90 °С	-	-	377	10
Обратная теплоспутниковая вода при 95 °С	-	-	399	20
Сбросные горючие заводские газы	-	27255	-	227
Топливный газ	-	33369	-	220
Тяжелые смолы пиролиза с отработанным пиробензином и «желтым» маслом	39300	-	-	10
Жидкий горючий сорбент А-2	41636	-	-	23
Метано-водородная фракция	-	28526	-	200
Нефтяной кокс	30180	-	-	200
Обратная теплоспутниковая вода при 70 °С	-	-	294	14,7
Конденсат с производства поликарбонатов при 130 °С	-	-	547	11

Из табл. 1 видно, что на нефтехимических производствах наибольший потенциал имеют вторичные энергоресурсы с топливной составляющей в виде горючих газов.

К настоящему времени на нефтехимических производствах, кроме собственного технологического заводского потребления, топливные и сбросные вторичные горючие газы в достаточно больших количествах сжигаются в факелах и в технологических свечах [8–9].

Бездымное сжигание на факеле №768 сбрасываемых аварийных и отработанных газов в количестве 230 т/час освоено в 2009 г. на блоке Э-500 на 3-й очереди завода ПЭВД ПАО «Казаньоргсинтез». Недостатками такого технического решения являются:

1. Загрязнение атмосферы и окружающей среды экологически вредными антропогенными загрязняющими выбросами.

2. Неиспользование потенциала энергосбережения для удешевления себестоимости выпуска товарной продукции.

Тяжелые обводненные смолы пиролиза и горючий жидкий сорбент сжигаются в котлах в смеси с топливным газом.

На заводе СКИ ПАО "Нижнекамскнефтехим" работает установка утилизации жидких вторичных горючих отходов, в виде сорбента А-2 в количестве 0,8 т/час, которые, в смеси с топливным газом в количестве 12000 м³/час, сжигаются в двух паровых котлах КВГ-ЗГМ с выработкой пара энергетических параметров в количестве 120 т/час и подачей этого пара на турбину, соединенную с электрогенератором.

На заводе СКИ ПАО "Нижнекамскнефтехим" запущена вторая установка такого же типа для утилизации жидких отходов с двумя котлами по 75 тонн пара в час [8].

Недостатками такого решения является невысокая эксплуатационная надежность сжигания жидких отходов в котлах с получением водяного пара энергетических параметров и последующей подачей этого пара на паровую турбину, соединенную с электрогенератором.

На заводе СКИ ПАО "Нижнекамскнефтехим", из-за высокой теплоты сгорания вторичных горючих отходов в виде сорбента А-2, трубки пароперегревателя в котлах КВГ-ЗГМ систематически разрушаются. Состав сорбента не постоянен из-за изменения содержания тяжелых смол и воды; теплота сгорания изменяется от 16000 до 40000 кДж/кг. При низких значениях теплоты сгорания жидких горючих отходов необходима дополнительная подача в топку природного газа для выработки необходимого количества энергетического пара для работы паровой турбины.

Количество вторичных горючих энергоресурсов в виде метано-водородной фракции, получаемой в ПАО «Таиф-НК», по годам на перспективу составляет: в 2019 г. – 381,4 млн.м³, в 2020 г. – 382,5 млн. м³.

Так как с ростом производственных мощностей нефтехимических заводов увеличивается потребность в электроэнергии, то для снижения себестоимости электрогенерации многие ТЭС планируют переход на сжигание в энергетических котлах смешанного топлива: природный газ в смеси с метано-водородной фракцией. Недостатком такого технического решения является ограничение сжигаемого количества метано-водородной фракции по топливной доле 12 % в смеси с природным газом.

Нефтяной кокс предполагается сжигать в смеси с природным газом. В перспективе к 2030 г. на Нижнекамской ТЭЦ-2 в качестве топлива будет использоваться: газ – 65 %, нефтяной кокс – 33 %, мазу – 2 % [9]. Недостатком такого решения является необходимость подготовки нефтяного кокса к камерному факельному сжиганию в энергетических котлах и наличие высококалорийного газового топлива, сжигаемого совместно с нефтяным коксом.

Использование энергопотенциала 1,5 МВт в виде тепла оборотной воды на заводе ПВД ПАО «Казаньоргсинтез» реализовано в 2007 г. с применением одноступенчатого теплового бромистолитиевого насоса АБХМ-1500П с паровым обогревом. Недостатками этого технического решения является незначительная мощность утилизируемой теплоты и потребность в греющем паре (в количестве 4,31 т/час) с температурой 115 °С. Конечным

результатом данного технического решения является производство холода $+7^{\circ}\text{C}$, используемого в технологии.

Известны конструкции АБХМ *Thermax* [10,11], мощностью 5,35 МВт и с коэффициентом преобразования 1,4, работающие на сжигании газа или жидкого топлива, производящие холодную воду $+2^{\circ}\text{C}$ летом и горячую воду $+60^{\circ}\text{C}$ зимой. Недостатком является невысокая температура получаемой горячей воды.

Выпускаемый ЗАО «Энергия» парокompрессионный тепловой насос НТ-3000 [12–15] мощностью по теплу утилизируемой воды 2,8 МВт с температурой $+30^{\circ}\text{C}$ и потребляемой электрической мощностью 0,63 МВт производит нагретую воду $+55^{\circ}\text{C}$ и холодную воду $+7^{\circ}\text{C}$ с коэффициентом преобразования 4,45. Недостатком является потребность в электроэнергии и невысокая температура нагретой воды.

С 2005 г. на Мозырском НПЗ эксплуатируется газотурбинная электростанция ГТЭ-15, с электрической мощностью 15 МВт и с КПД в когенерационном цикле, равном 30 %, использующая в качестве топлива метано-водородную фракцию с содержанием водорода до 26 % об. [16]. В составе ГТЭ-15 используется дожимающий винтовой компрессор ZKR-204, сжимающий метано-водородную фракцию с давления 0,9 до 2,0 МПа. Недостатком этой схемы является невозможность использования низкопотенциальной тепловой энергии оборотной и сбросной воды.

Как видно из вышеприведенного анализа, имеющиеся технические решения по использованию вторичных энергоресурсов не являются комплексными и универсальными по конечному результату, пригодному для практического применения с высоким показателем энергосбережения.

Предлагаемая схема комплексного использования вторичных энергоресурсов нефтехимических производств показана на рис 1. Энергетический баланс универсального модуля теплонасосного комплекса для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов, рассчитанный с учетом материалов работ [12–20], приведен в табл. 2.

Универсальный модуль теплонасосного комплекса для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов (рис. 1) состоит из трех блоков: газотурбинного блока 1 на базе ГТЭ-2,5 (электрической мощностью 2,5 МВт) с водогрейным котлом-утилизатором, парокompрессионного теплонасосного блока на базе двух тепловых насосов НТ-3000 (единичной мощностью до 2,8 МВт), абсорбционного теплонасосного блока из двух АБХМ *Thermax*, единичной мощностью до 5,35 МВт.

Мощность ресурса $Q_{\text{н}}$, полученная в испарителе теплового насоса НТ-3000, определяется по формуле, МВт,

$$Q_{\text{н}} = G(i_{\text{в}2} - i_{\text{в}1}), \quad (1)$$

где G – расход оборотной воды, кг/с; $i_{\text{в}2}$, $i_{\text{в}1}$ – энтальпия оборотной воды на выходе и входе испарителя соответственно, кДж/кг.

Мощность, затраченная в парокompрессионном тепловом насосе на передачу тепла от оборотной воды нагреваемой воде $N_{\text{п}}$, МВт:

$$N_{\text{п}} = Q_{\text{н}} \cdot \eta / \varphi_{\text{п}}, \quad (2)$$

где $\eta = 0,8$ – коэффициент, учитывающий степень совершенства термодинамического цикла парокompрессионного теплового насоса [1–5]; $\varphi_{\text{п}} = 4,45$ – коэффициент преобразования энергии для парокompрессионного теплового насоса НТ-3000.

Для абсорбционного теплового насоса затрачиваемая на работу мощность по сжигаемому вторичному топливу $Q_{\text{т}}$, МВт, вычисляется как

$$Q_{\text{т}} = Q_{\text{а}} / \varphi_{\text{а}}, \quad (3)$$

где Q_a – мощность, получаемая потребителем от абсорбционного теплового насоса, МВт;
 $\varphi_a = 1,4$ – коэффициент преобразования абсорбционного теплового насоса АБХМ *Thermax* [10,11].

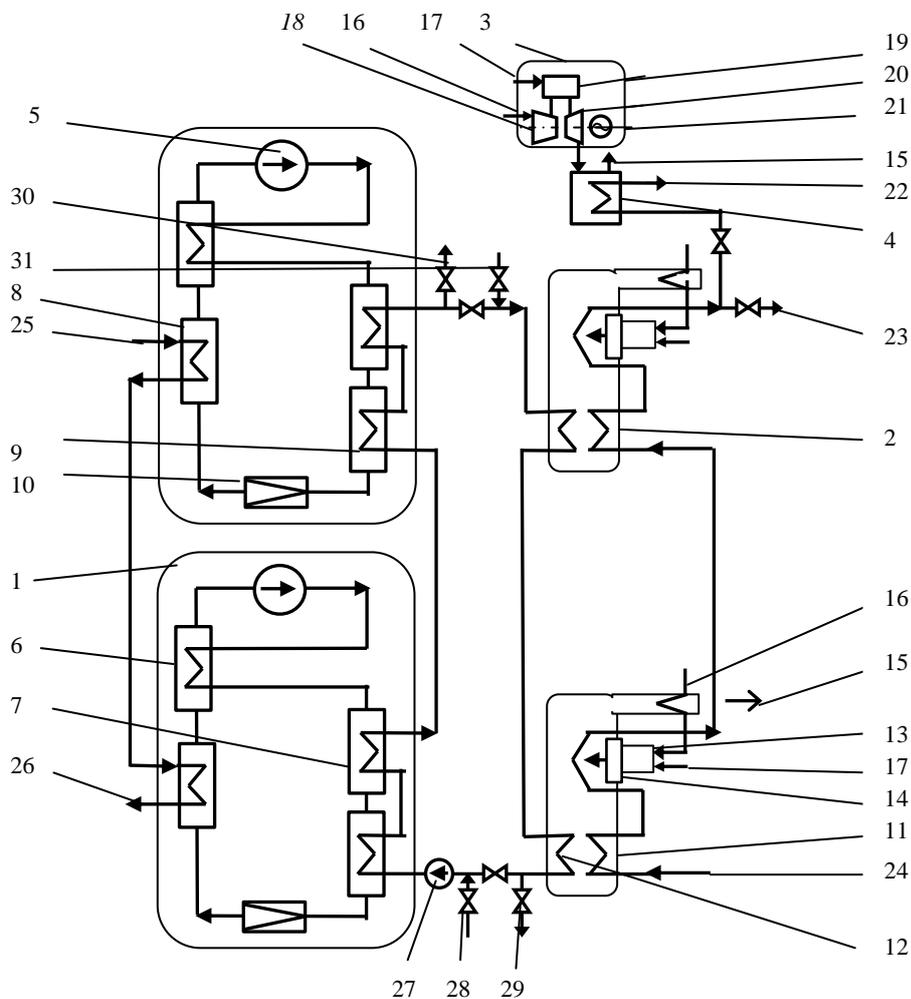


Рис. 1. Схема универсального модуля теплонасосного комплекса для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов:

- 1 – парокompрессионный тепловой насос; 2 – абсорбционный бромистолитиевый тепловой насос;
 3 – газотурбинная установка; 4 – водяной котел- утилизатор; 5 – электроприводной компрессор;
 6 – регенеративный теплообменник; 7 – конденсатор; 8 – испаритель; 9 – переохладитель;
 10 – дроссель; 11 – абсорбер; 12 – испарительный теплообменник; 13 – генератор;
 14 – конденсатор; 15 – продукты сгорания; 16 – забор воздуха; 17 – топливо; 18 – компрессор;
 19 – камера сгорания; 20 – газовая турбина; 21 – электрогенератор; 22 – перегретая
 теплофикационная вода 150 °С; 23 – теплофикационная вода 130 °С; 24 – обратная вода 70 °С;
 25 – обратная вода 25 °С; 26 – обратная вода 5 °С; 27 – циркуляционный насос;
 28 – охлаждаемая вода 40 °С; 29 – охлажденная вода 10 °С; 30 – нагретая вода 70 °С;
 31 – обратная вода 30 °С

Энергетический баланс универсального модуля теплонасосного комплекса для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов

Приход		Расход	
Наименование энергоресурса	Значение	Наименование энергоресурса	Значение
Блок газотурбинной установки			
Теплота сжигаемого топливного газа, МВт	10	Электроэнергия для двух парокompрессионных тепловых насосов, МВт	1,26
Тепло, поступающее сводой при 130 °С для нагрева, МВт	7,0	Электроэнергии потребителям, МВт	1,24
		Отпуск тепла с нагретой до 150 °С водой, МВт	13,9
		Потери тепла с уходящими газами, МВт	0,6
Всего полученных энергоресурсов, МВт	17,0	Всего израсходованных энергоресурсов, МВт	17,0
Блок из двух парокompрессионных тепловых насосов			
Электроэнергия для двух парокompрессионных тепловых насосов, МВт	1,26	Энергоресурс, отданный циркуляционной воде для нагрева до 70 °С, МВт	7,0
Тепло, принесенное оборотной водой при 25 °С, МВт	5,74		
Всего полученных энергоресурсов, МВт	7,0	Всего израсходованных энергоресурсов, МВт	7,0
Блок из двух абсорбционных тепловых насосов			
Теплота сжигания сбросного газа в генераторе теплового насоса, МВт	5	Тепло, отданное воде при ее нагреве до 130 °С, МВт	7,0
Энергоресурс, принесенный с циркуляционной водой с температурой °С, МВт	2,3	Потери тепла с уходящими газами, МВт	0,3
Всего полученных энергоресурсов, МВт	7,3	Всего израсходованных энергоресурсов, МВт	7,3
Итого полученных модулем энергоресурсов, МВт	31,3	Итого израсходованных модулем энергоресурсов, МВт	31,3

Обсуждение результатов

Из представленных в табл. 2 результатов видно, что по используемому вторичному энергоресурсу для функционирования универсального модуля в составе ГТЭ-2,5 двух НТ-3000 и двух АБХМ *Thermax* основная доля принадлежит сбросным и топливным газам в количестве 15 МВт. Расходуемая для работы модуля теплонасосного комплекса тепловая мощность оборотной воды с температурой 25 °С составляет 5,74 МВт. Модуль теплонасосного комплекса имеет тепловую мощность по используемым на входе вторичным энергетическим ресурсам $Q_{\text{вх}}=15,74$ МВт. Конечным продуктом работы теплонасосного комплекса является теплота $Q_{\text{вых}}=13,9$ МВт в виде нагретой до 150 °С воды и электроэнергия в виде мощности 2,5 МВт.

Коэффициент полезного использования энергоресурсов в модуле теплонасосного комплекса $\eta_{\text{и.э.}} = Q_{\text{вых}} \cdot 100 / Q_{\text{вх}} = 88,3 \%$.

По сравнению с известными имеющимися и рассмотренными выше техническими решениями, предлагаемый модуль теплонасосного комплекса является универсальным как по используемым в нем потенциалам вторичных энергетических ресурсов, так и по их видам. Для работы комплекса не требуется внешнего подвода электроэнергии.

Условная конструкционная формула модуля 1ГТУ+1КУ+2НТ+2АБХМ *Thermax* позволяет по имеющимся в промышленности номенклатурам и типам оборудования

создавать блоки, а на их основе – модули теплонасосных комплексов для утилизации вторичных ресурсов в нефтехимии с широким диапазоном используемых мощностей.

Выводы

1. Созданный теплонасосный комплекс позволяет утилизировать одновременно различные виды вторичных энергоресурсов нефтехимических производств.
2. Основным потенциалом по используемым ресурсам для разработанного теплонасосного комплекса служит теплота горючих сбросных газов и теплота оборотной воды, а конечными получаемыми энергоресурсами являются теплота теплофикационной воды с температурой 150 °С и электроэнергия для внутреннего и внешнего потребления.

Литература

1. Таймаров М.А., Ефремов Д.А., Степанова Т.О. Повышение эффективности использования вторичных тепловых энергоресурсов в ОАО "Казаньоргсинтез" // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т.18, № 22. С. 75–78.
2. Таймаров М.А. Направления развития энергосбережения в энергетике. Казань: КГЭУ, 2003. 67 с.
3. Таймаров М.А. Основы физико-химических процессов производства тепловой энергии. Казань: КГЭУ, 2003. 120 с.
4. Григоров В.Г., Нейман В.К., Сураков С.Д. Утилизация низкопотенциальных тепловых вторичных энергоресурсов на химических предприятиях. М: Химия, 1987. 240 с.
5. Калкин И.М. Перспективы развития тепловых насосов // Холодильная техника. 1994. №1. С. 4–8.
6. Слесаренко В.В., Князев В.В., Слесаренко И.В. Перспективы применения тепловых насосов при утилизации теплоты городских стоков // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. №3 (77): С. 28–33.
7. Аникина И.Д., Сергеев В.В., Амосов Н.Т., Лучко М.Г. Использование тепловых насосов в технологических схемах генерации тепловой энергии ТЭЦ // Альтернативная энергетика и экология. 2016. №3–4 (191–192): С. 39–49.
8. Информационное агентство REGNUM // URL: <https://www.regnum.ru/news/26965.html> (дата обращения: 16.12.2017).
9. Деловая электронная газета Татарстана «Бизнес online» // URL: <https://www.business-gazeta.ru/news/315798> (дата обращения: 04.02.2018).
10. Алексиков И.Ю. Опыт применения абсорбционного холодильного оборудования для повышения энергоэффективности при модернизации нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий // Химическая техника. 2016. №2. С. 18–20.
11. Ковецкий В.М., Ковецкая М.М., Лаврик В.М. Эффективное использование внутренних топливных источников нефтеперерабатывающих заводов // Промышленная теплотехника. 2010. Т.32, №5. С. 72–78.
12. Соколов А.Д., Муzychuk С.Ю., Муzychuk Р.И. Тепловые отходы и их влияние на энергоэффективность российской экономики: территориальный и отраслевой аспекты // Экономический анализ: теория и практика. 2016. №6. С. 44–56.
13. Слесаренко В.В., Князев В.В., Слесаренко И.В. Перспективы применения тепловых насосов при утилизации теплоты городских стоков // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. №3 (77). С. 28–33.
14. Аникина И.Д., Сергеев В.В., Амосов Н.Т., Лучко М.Г. Использование тепловых насосов в технологических схемах генерации тепловой энергии ТЭЦ // Альтернативная энергетика и экология. 2016. №3–4 (191–192). С. 39–49.
15. Бондаренко А.С., Каллаш В.Л., Литвин А.А. Эксплуатация судовых газотурбинных двигателей на газойле и водородсодержащем газе, получаемых при переработке нефти // Наукові праці. 2006. Том 61, выпуск 48. С. 218–219.
16. Pedersen S.E. Теплонасосная станция мощностью 18 МВт, утилизирующая низкопотенциальное сбросное тепло сточных вод в Норвегии // Тепловые насосы. 2011. №1. С. 36–37.

17. Горшков В.Г., Паздников А.Г., Мухин Д.Г., Севастьянов Р.В. Промышленный опыт и перспективы использования отечественных абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин и тепловых насосов нового поколения // Холодильная техника. 2007. №8. С. 23–31.

18. Daniel Brdar R., Robert M. Jones. GE IGCC Technology and Experience with Advanced Gas Turbines // GE Power Systems. Электронный ресурс. Режим входа: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/igcc-h2-sygas>.

19. Nakamura D. N. Global ethylene capacity increases slightly in 2006 // Oil and Gas Journal. 2007. V. 105, № 27. P.45–48.

20. Hisajlma D., Kawamura H., Oouchi T. Determination of Thermal Properties of Dilute LiBr-Water Solutions // International Journal of Thermophysics. 1997. Vol. 18, No. 2. P. 397–406.

Авторы публикации

Таймаров Михаил Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: taimarovma@yandex.ru.

Ильин Владимир Кузьмич – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), проректор по непрерывному образованию Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ilinwk@rambler.ru.

Осинов Айрат Линарович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: nord7077@yandex.ru.

Долгова Анастасия Николаевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). dolgova.an@list.ru. Доцент кафедры «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС).

Ахмеров Артем Владимирович – канд. химич. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: akhm@mail.ru.

References

1. Taimarov M.A., Efremov D.A., Stepanova T.O. Increase of efficiency of secondary thermal energy resources use in OJSC "Kazanorgsintez" // Bulletin of Kazan Technological University. 2015. V.18, No.22. P. 75–78.

2. Taimarov M.A. Directions for the development of energy conservation in the energy sector. Kazan: KGEU, 2003. 67 p.

3. Taimarov M.A. Fundamentals of physical and chemical processes for the production of thermal energy. Kazan: KGEU, 2003. 120 p.

4. Grigorov V.G., Neiman V.K., Surakov S.D. Utilization of low-potential thermal secondary energy resources at chemical enterprises. M: Chemistry, 1987. 240 p.

5. Kalkin I.M. Prospects for the development of heat pumps // Refrigeration technology. 1994. No. 1. P. 4–8.

6. Slesarenko VV, Knyazev VV, Slesarenko IV. Perspektivy primeneniya teplovykh nasosov pri utilizatsii teplozy gorodskikh stokov. Energoberezeniye i vodopodgotovka. 2012;3(77): 28–33.

7. Anikina ID, Sergeyev VV, Amosov NT, Luchko MG. Ispolzovaniye teplovykh nasosov v tekhnologicheskikh skhemakh generatsii teplovooy energii TETs. Alternativnaya energetika i ekologiya. 2016; 3–4 (191–192): S. 39–49.

8. REGNUM news agency // URL: <https://www.regnum.ru/news/26965.html> (accessed: 16.12.2017).

9. Business electronic newspaper of Tatarstan "Business online" // URL: <https://www.business-gazeta.ru/news/315798> (accessed: 04.02.2018).

10. Alexikov I.Y. Experience in the use of absorption refrigeration equipment to improve energy efficiency in the modernization of oil refining and petrochemical enterprises // Chemical Engineering. 2016. No. 2. P. 18–20.

11. Kovetsky V.M., Kovetsky M.M., Lavrik V.M. Effective use of internal fuel sources of oil refineries // Industrial heat engineering. 2010. V.32, No. 5.. P. 72–78.

12. Sokolov A.D., Muzychuk S.Y., Muzychuk R.I. Heat Waste and Their Influence on the Energy Efficiency of the Russian Economy: Territorial and Branch Aspects // Economic Analysis: Theory and Practice. 2016. No. 6. P. 44–56.

13. Slesarenko V.V., Knyazev V.V., Slesarenko I.V. Prospects for the use of heat pumps in the utilization of the heat of urban effluents // Energy saving and water treatment. 2012. No. 3 (77). P. 28–33.

14. Anikina I.D., Sergeev V.V., Amosov N.T., Luchko M.G. The use of heat pumps in technological schemes for generating thermal energy of CHPP // Alternative energy and ecology. 2016. No. 3-4 (191-192). P. 39–49.

15. Bondarenko A.S., Callas V.L., Litvin A.A. Operation of marine gas turbine engines on gas oil and hydrogen-containing gas obtained from oil refining // Scientific works. 2006. V. 61, issue 48. P. 218–219.

16. Pedersen S.E. The heat pump station with a capacity of 18 MW, utilizing the low-potential wastewater waste heat in Norway // Heat pumps. 2011. No. 1. P. 36–37.

17. Gorshkov V.G., Pazdnikov A.G., Mukhin D.G., Sevastyanov R.V. Industrial Experience and Prospects for Using Domestic Absorption Bromistolithium Refrigeration Machines and Heat Pumps of the New Generation // Refrigerating Equipment. 2007. No. 8. P. 23–31.

18. Daniel Brdar R., Robert M. Jones. GE IGCC Technology and Experience with Advanced Gas Turbines // GE Power Systems. Электронный ресурс. Режим входа : <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/igcc-h2-sygas>

19. Nakamura D.N. Global ethylene capacity increases slightly in 2006 // Oil and Gas Journal. 2007. V. 105, № 27. P.45–48.

20. Hisajima D., Kawamura H., Oouchi T. Determination of Thermal Properties of Dilute LiBr-Water Solutions // International Journal of Thermophysics. 1997. Vol. 18, No. 2. P. 397–406.

Authors of the publication

Taimarov Mikhail Alexandrovich – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ilin Vladimir Kyzmitch – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Osipov Ayrat Linarovich – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Dolgova Anastasia Nikolaevna – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Akhmerov Artem Vladimirovich – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

30 октября 2018 г.



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПАРОВОГО КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА

Э.Р. Сайфуллин¹, В.М. Ларионов¹, Ю.В. Ваньков²

¹ Казанский Федеральный университет, г. Казань, Россия

² Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0823-9051>, mr.emilsr@gmail.com

Резюме: Состав газообразного топлива может меняться в широких пределах, в зависимости от источника, времени и стадии разработки конкретного месторождения. Изменение состава приводит к изменению теплофизических характеристик топлива, что влияет на стабильность работы котельных агрегатов. В данной статье представлены результаты численного моделирования стабилизации теплопроизводительности и полноты сгорания попутного нефтяного газа (ПНГ) в случае длительного непрерывного изменения его состава. Моделирование проводилось по разработанному ранее алгоритму оптимизации процесса горения углеводородного топлива (УВТ) переменного состава. Результаты моделирования показали, что при медленном непрерывном изменении удельной теплоты сгорания (УТС) топлива с относительной скоростью изменения 1 % за время тепловой инерции, стабилизация работы котла по предложенному алгоритму позволяет поддерживать температуру теплоносителя на выходе из котла в пределах 10 % от требуемой.

Ключевые слова: теплоэнергетика; котлоагрегат; оптимизация горения; переменный состав топлива; попутный нефтяной газ

Благодарности: Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

NUMERICAL MODELING OF STABILIZATION OF THE HEAT OUTPUT OF A STEAM BOILER IN THE COMBUSTION OF ASSOCIATED PETROLEUM GAS

E.R. Saifullin¹, V.M. Larionov¹, Yu.V. Vankov²

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0823-9051>, mr.emilsr@gmail.com

Abstract: The composition of the gaseous fuel can vary widely, depending on the source, time and stage of development of a particular field. Changes in composition leads to a change in the thermophysical characteristics of the fuel, which affects the stability of the operation of the boiler units. This article presents the results of a numerical simulation of the stabilization of heating capacity and the completeness of combustion of associated petroleum gas (APG) in the event of a prolonged, continuous change in its composition. The simulation was carried out using the

previously developed algorithm for optimizing the combustion process of the hydrocarbon fuel (HCF) of variable composition. The simulation results showed that with a slow continuous change in the fuel low heating value with a relative rate of change of 1% during the time of thermal inertia, the stabilization of the operation of the boiler according to the proposed algorithm allows maintaining the steam temperature at the outlet within 10% of the required.

Keywords: heat power engineering, industrial boiler, combustion optimization, variable fuel composition, heat engineering, associated petroleum gas

Acknowledgments: The work is performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University

For citation: Saifullin E.R., Larionov V.M., Vankov Yu.V. Numerical modeling of stabilization of the heat output of a steam boiler in the combustion of associated petroleum gas. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):15-21. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-15-21.

Введение

Согласно Указу Президента Российской Федерации № 899 от 07.07.2011 г. приоритетным направлением развития науки, технологий и техники является «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а одной из критических технологий Российской Федерации развития является «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» [1]. Также в Энергетической стратегии России на период до 2030 года приоритетными направлениями развития энергетики являются снижение удельных затрат топлива при производстве и потреблении энергоресурсов за счет применения энергосберегающих технологий и оборудования [2]. Одним из направлений снижения потребления традиционных энергоресурсов является использование альтернативных видов топлива, таких как биогаз, синтез газ и газообразные промышленные отходы. В частности, для Российской Федерации актуально использование попутного нефтяного газа (ПНГ).

В 2009 году Правительством Российской Федерации принято постановление № 7 от 8 января «О мерах по стимулированию сокращения загрязнения атмосферного воздуха продуктами сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках», в котором заложено требование по доведению уровня рационального использования попутного газа до 95 % [4]. В США также отмечают важность рационального использования углеводородных отходов, поэтому Агентство по охране окружающей среды США, начиная с 2008 г., рассматривает любой газ, сгенерированный на нефтеперерабатывающем заводе, в качестве топлива [5]. В настоящее время используют следующие способы рационального использования ПНГ [10–14].

1. Переработка на газоперерабатывающем заводе.
2. Закачка в продуктивный пласт (сайклинг-процесс, «газлифт»).
3. Переработка ПНГ по технологии *GTL* (*gas to liquid*) или его сжижение *LPG* (*liquefied petroleum gas*).
4. Закачка во временные подземные хранилища.
5. Использование ПНГ в качестве альтернативного топлива для выработки электрической и тепловой энергии в энергетических установках.

В отличие от традиционного топлива, содержание компонентов в попутном нефтяном газе может меняться в больших пределах в зависимости от источника, времени и стадии разработки конкретного месторождения. В нефтяном пласте попутный нефтяной газ находится в растворенном виде или располагается над нефтью в «газовой шапке». Состав

газов, находящихся непосредственно над нефтью, может сильно отличаться от состава газов, растворенных в нефти. Состав газов сильно зависит от условий отбора пробы, от давления, под которым находится газ в скважине, соотношения в пробе свободного газа из залежи и газа, выделившегося из нефти при ее подъеме в скважине. В связи с этим содержание и состав тяжелых углеводородов в газах, отобранных на одной и той же площади, показывают значительные колебания.

Характерной особенностью состава попутных нефтяных газов является наличие в них, помимо метана (CH_4), этана (C_2H_6), пропана (C_3H_8), бутана (C_4H_{10}) и паров более тяжелых углеводородов. ПНГ имеет высокую теплотворную способность, которая меняется в пределах от 37673 до 62788 кДж/м³ из-за нестабильности его состава [3]. Данные изменения приводят к нарушению стабильности теплового эффекта процесса горения, что может привести к негативным последствиям [4, 5]. Возникает вероятность срыва пламени (уход пламени вглубь топочного пространства), обратной вспышки (распространение пламени внутрь горелки), неустойчивости горения (пульсации давления), самовоспламенения (возгорание газозооной смеси в смесеобразовательном пространстве), локального перегрева поверхностей.

Имеющиеся способы оптимизации работы котла, основанные на контроле состава уходящих газов, расчете термического КПД, измерении температуры горения, не совершенны. Общими недостатками этих способов являются: высокая трудоемкость, конструктивная сложность исполнения и главное – отсутствие возможности оперативно реагировать на случайные изменения состава сжигаемого топлива. Такая ситуация является следствием недостаточной изученности термодинамических характеристик процесса горения углеводородного топлива в периоды изменения его состава, отсутствия научно обоснованных способов стабилизации теплового эффекта горения и теплового потока, передаваемого теплоносителю. Все вышеизложенное свидетельствует об актуальности данной темы.

Цель работы заключалась в численном моделировании стабилизации теплопроизводительности и полноты сгорания очищенного попутного нефтяного газа в случае длительного непрерывного изменения его состава по разработанному ранее алгоритму.

Методы

Авторами ранее была разработана квазистационарная модель стабилизации скорости тепловыделения при горении смеси УВТ метанового ряда и воздухом с обеспечением полного сгорания топлива в случае кратковременных и длительных изменений его УТС [6–9], а также был предложен алгоритм [10, 11], позволяющий стабилизировать скорость тепловыделения котлоагрегата при сжигании УВТ метанового ряда переменного состава с обеспечением его полного сгорания. Согласно алгоритму, при уменьшении температуры теплоносителя на выходе, вызванном снижением УТС топлива, необходимо начать постепенное увеличение подачи топлива, без изменения расхода воздуха, пока температура теплоносителя не станет прежней. В случае постоянства температуры проводят конкретизацию режима горения однократным уменьшением расхода топлива. Резкое снижение температуры указывает на оптимальный режим горения, и, согласно алгоритму, необходимо вернуться к предыдущему значению расхода топлива, восстанавливая оптимальный режим. Постоянство температуры после однократного уменьшения подачи топлива указывает на то, что началось увеличение удельной теплоты сгорания, которое компенсирует появившийся недожог топлива, так как расход воздуха не изменился. Поэтому необходимо продолжать дальнейшее снижение расхода топлива до того момента, пока температура не начнет снижаться. После этого необходимо вернуть предыдущее значение расхода топлива, соответствующее начальной постоянной температуре.

Численное моделирование проводилось согласно разработанному алгоритму с применением нормативного метода теплового расчета котлов [12].

Условия расчета

Для расчета выбран паровой котёл ДЕ 10-14. Параметры режима работы котла указаны в таблице.

Таблица

Параметры режима работы котла

№	Параметр	Значение
1.	Паропроизводительность котла D , кг/ч	6097
2.	Температура насыщенного пара $t_{п}$, °С	172,1
3.	Энтальпия насыщенного пара $H_{п}$, кДж/кг	2770
4.	Температура воды на входе $t_{в}$, °С	100
5.	Энтальпия воды на входе $H_{в}$, кДж/кг	508
6.	Температура продуктов сгорания ϑ , °С	125
7.	Температура воздуха на входе в котел $t_{вхв}$, °С	27
8.	Время тепловой инерции $\tau_{тп}$, мин	1

В качестве примера углеводородного топлива переменного состава был взят очищенный попутный нефтяной газ (т.е. учитывался только углеводородный состав газа). Было рассмотрено два случая: длительное уменьшение и увеличение УТС топлива (рис. 1).

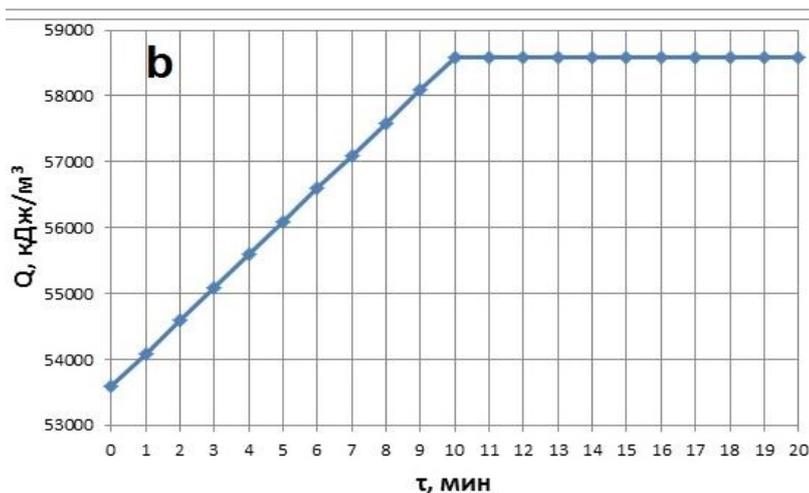
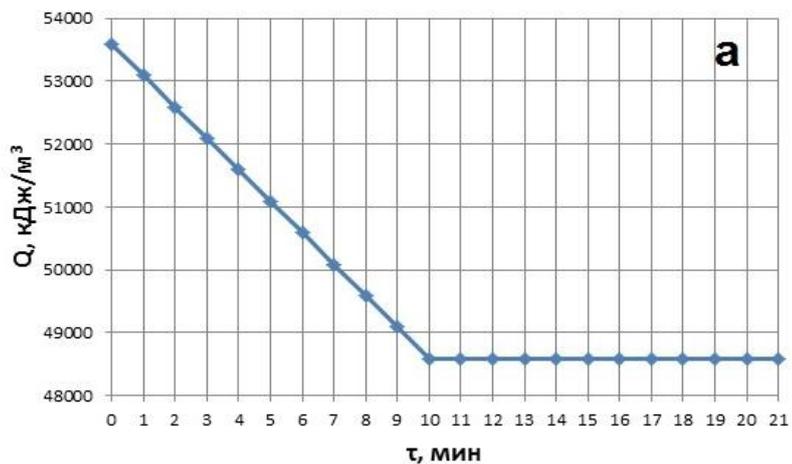


Рис. 1. Длительное увеличение (а) и уменьшение (б) УТС топлива по времени

Скорость изменения УТС $\lambda_q = 500$ кДж/мин·м³, начальный расход топлива $G_f = 276,5$ м³/ч, КПД брутто $\eta = 0,931$. Анализ производился в квазистационарном приближении; это значит, что в интервале времени, равном времени тепловой инерции котла, энтальпия пара остается постоянной. В конце интервала энтальпия скачком принимает значение, соответствующее удельной теплоте сгорания топлива, которая была в начале интервала, то есть $H_n(\tau)$ считается функцией от $Q_n^p(\tau - \tau_{ин})$.

Результаты

Численное моделирование показало, что регулирование работы котла по предложенному алгоритму позволяет поддерживать температуру теплоносителя в пределах 10 % от заданной (рис. 2, а, рис. 3, а) в результате соответствующего регулирования расхода топлива (рис. 2, б, рис. 3, б) с обеспечением полного сгорания топлива. Минимальный шаг изменения расхода топлива составлял 0,125 %.

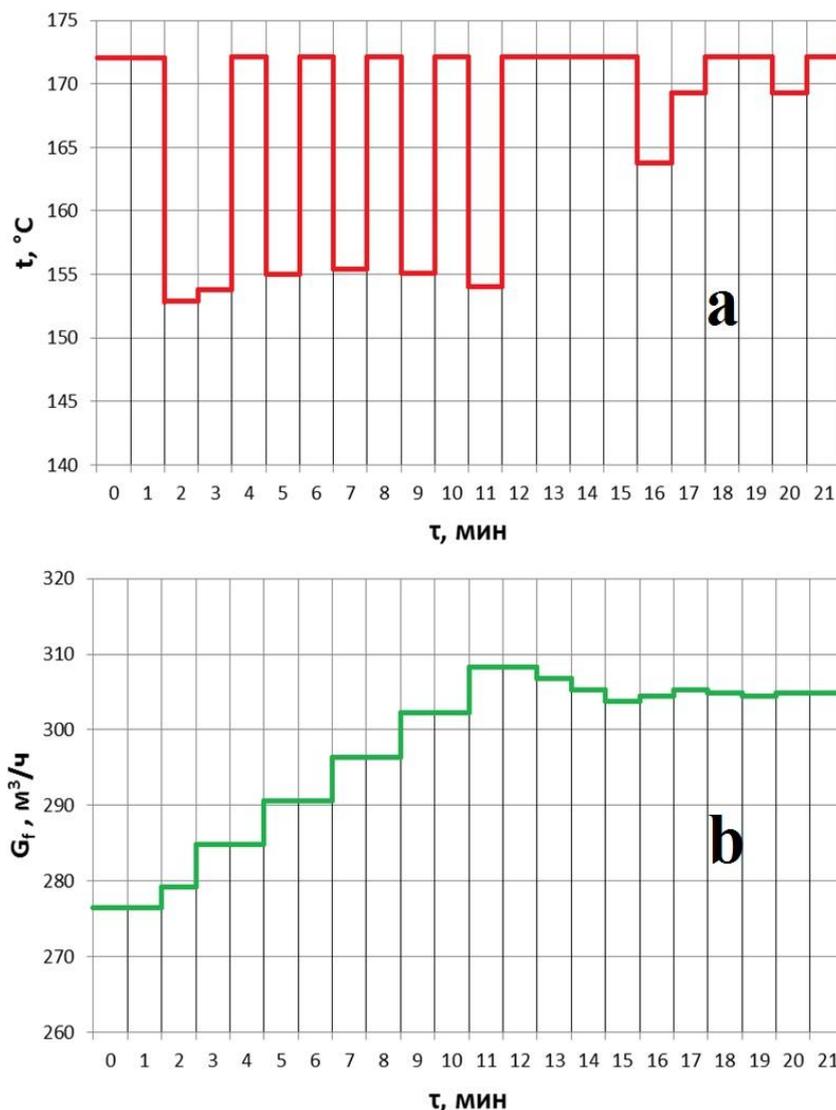


Рис. 2. Изменение температуры пара на выходе из котла t (а) и оптимального расхода топлива G_f (б) от времени при длительном уменьшении УТС

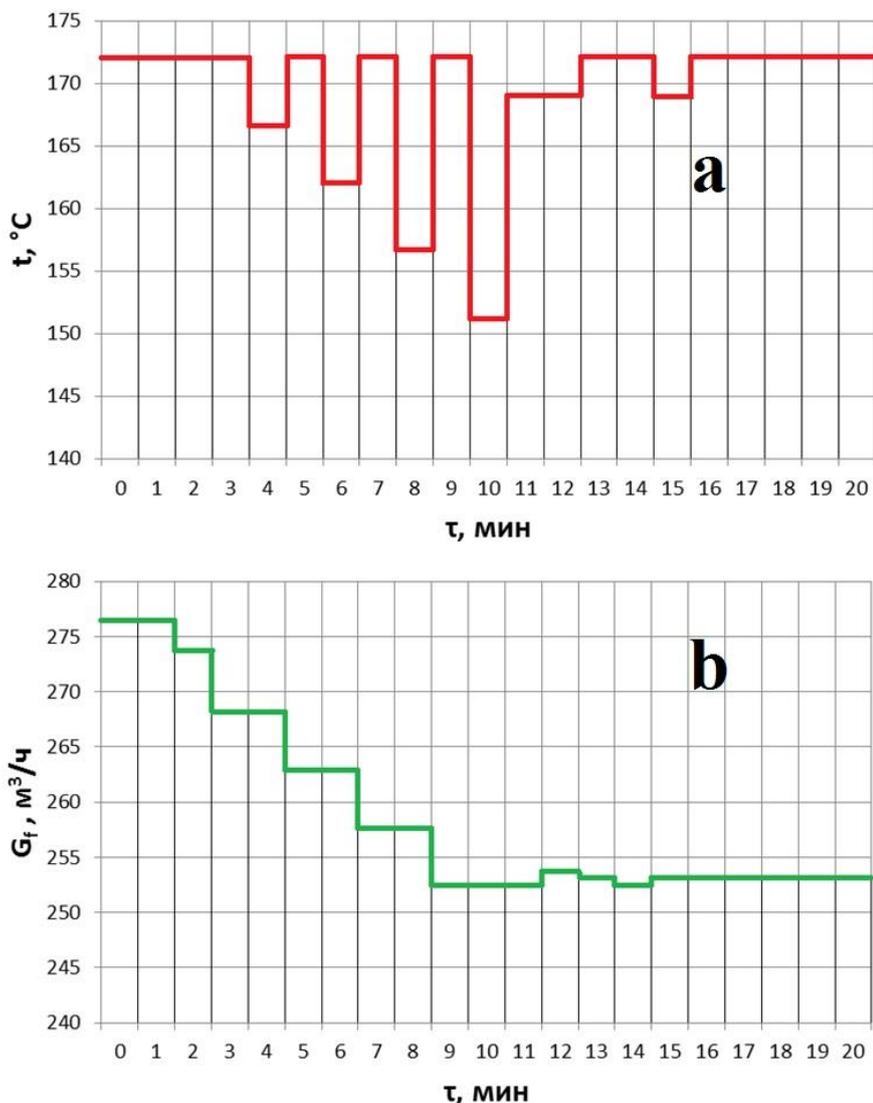


Рис. 3. Изменение температуры пара на выходе из котла t (a) и оптимального расхода топлива G_f (b) от времени при длительном увеличении УТС

Выводы

Численное моделирование показало, что при непрерывном случайном уменьшении (или увеличении) УТС ПНГ, вызванном колебанием его состава, стабилизация теплопроизводительности парового котла ДЕ 10-14 с обеспечением полного сгорания топлива осуществляется дискретными увеличениями (или уменьшениями) расхода топлива на величину, позволяющую поддерживать температуру пара в заданном контрольном диапазоне 10 %.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации" от 7 июля 2011 г № 899 // Собрание законодательства Российской Федерации.
2. Акт правительства Российской Федерации "Энергетическая стратегия России на период до 2030 года" от 13 ноября 2009 г. № 1715-п // Собрание законодательства Российской Федерации.

3. A.I. Gur'yanov, O.A. Evdokimov, Sh.A. Piralishvili, S.V. Veretennikov, R.E. Kirichenko, D.G. Ievlev Analysis of the Gas Turbine Engine Combustion Chamber Conversion to Associated Petroleum Gas and Oil // Russian Aeronautics (Iz.VUZ). 2015. №58. С. 205–209.

4. О мерах по стимулированию сокращения загрязнения атмосферного воздуха продуктами сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках: Постановление Правительства РФ №7 от 8 января 2009 года.

5. U.S. Environmental Protection Agency, Standards of Performance for Petroleum Refineries, 40 CFR 60, Subpart J, Section 60.101(d), U.S. Government Printing Office, Washington, DC, Electronic Code of Federal Regulations, current as of June 12, 2008.

6. Kayadelen H.K. Effect of natural gas components on its flame temperature, equilibrium combustion products and thermodynamic properties, Journal of Natural Gas Science and Engineering 45 (2017) 456-473.

7. Sayad P. Operational stability of lean premixed combustion in gas turbines. An experimental study on gaseous alternative fuels, Doctoral Dissertation (2016), Lund University.

8. Saifullin E.R. Optimization of burning process of hydrocarbon fuels with varying specific heat of combustion / E.R. Saifullin, Yu.V. Vankov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 86. 2015. № 012006.

9. Saifullin E.R. Thermal effect of hydrocarbon fuels combustion after a sudden change in the specific calorific value / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov // Journal of Physics: Conference Series. V. 669. 2016. № 012043.

10. Saifullin E.R. Optimization of hydrocarbon fuels combustion variable composition in thermal power plants / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov // Journal of Physics: Conference Series. V. 669. 2016. № 012037.

11. Saifullin E.R. The heat effect of combustion process depending on fuel composition fluctuations / E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malahov, V.M. Larionov, O.V. Iovleva // Journal of Physics: Conference Series. V. 789. 2017. № 012045.

12. Ларионов В.М., Сайфуллин Э.Р., Назарычев С.А., Малахов А.О., Ваньков Ю.В. Алгоритм оптимизации процесса сжигания попутного нефтяного газа в тепловых энергетических установках с учетом непостоянства его состава // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. №19. С. 3–9.

13. Пат. 2647940 Рос. Федерация: МПК F23C 1/02, F23C 1/08. Способ автоматической оптимизации процесса сжигания топлива переменного состава / В.М. Ларионов, Ю.В. Ваньков, Э.Р. Сайфуллин, С.А. Назарычев, А.О. Малахов; Заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВО КФУ, RU. – № 2017116036/06; заявл. 04.05.2017; опубл. 21.03.2018; бюл. №9. 6 с.

14. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Изд-е 3-е, перераб. и доп. СПб: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.

Авторы публикации

Сайфуллин Эмиль Ринатович – аспирант Казанского федерального университета (КФУ).

Ларионов Виктор Михайлович – д-р техн. наук, профессор Казанского федерального университета (КФУ).

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Decree of the President of the Russian Federation "On the approval of priority directions for the development of science, technology and technology in the Russian Federation and the list of critical

technologies of the Russian Federation" of July 7, 2011 No. 899 // Collected Legislation of the Russian Federation.

2. Act of the Government of the Russian Federation "The Energy Strategy of Russia for the period until 2030" of November 13, 2009 No. 1715-p // Meeting of the Legislation of the Russian Federation.

3. A.I. Gur'yanov, O.A. Evdokimov, Sh.A. Piralishvili, S.V. Veretennikov, R.E. Kirichenko, D.G. Ievlev Analysis of the Gas Turbine Engine Combustion Chamber Conversion to Associated Petroleum Gas and Oil // Russian Aeronautics (Iz.VUZ). 2015. №58. C. 205–209.

4. O merakh po stimulirovaniyu sokrashcheniya zagryazneniya atmosfernogo vozdukha produktami szhiganiya poputnogo neftyanogo gaza na fabel'nykh ustanovkakh: Postanovleniye Pravitel'stva RF №7 ot 8 yanvarya 2009 goda.

5. U.S. Environmental Protection Agency, Standards of Performance for Petroleum Refineries, 40 CFR 60, Subpart J, Section 60.101(d), U.S. Government Printing Office, Washington, DC, Electronic Code of Federal Regulations, current as of June 12, 2008.

4. Kayadelen H.K. Effect of natural gas components on its flame temperature, equilibrium combustion products and thermodynamic properties // Journal of Natural Gas Science and Engineering 45 (2017) 456–473.

5. Sayad P. Operational stability of lean premixed combustion in gas turbines. An experimental study on gaseous alternative fuels, Doctoral Dissertation (2016), Lund University.

6. Saifullin E.R. Optimization of burning process of hydrocarbon fuels with varying specific heat of combustion / E.R. Saifullin, Yu.V. Vankov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 86. 2015. № 012006.

7. Saifullin, E.R. Thermal effect of hydrocarbon fuels combustion after a sudden change in the specific calorific value / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov // Journal of Physics: Conference Series. V. 669. 2016. № 012043.

8. Saifullin E.R. Optimization of hydrocarbon fuels combustion variable composition in thermal power plants / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov // Journal of Physics: Conference Series. V. 669. 2016. № 012037.

9. Saifullin E.R. The heat effect of combustion process depending on fuel composition fluctuations / E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malahov, V.M. Larionov, O.V. Iovleva // Journal of Physics: Conference Series. V. 789. 2017. № 012045.

10. Larionov V.M., Saifullin E.R., Nazarychev S.A., Malakhov A.O., Vankov Yu.V. Algorithm for optimizing the process of burning associated petroleum gas in thermal power plants, taking into account the variability of its composition // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problems of energy. 2017. № 19. P. 3–9.

11. Pat. 2647940 Ros. Federation: IPC F23C 1/02, F23C 1/08. The method of automatic optimization of the process of burning fuel of variable composition / V.M. Larionov, Yu.V. Vankov, E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malakhov; Applicant and patent holder: FGAOU VO KFU, RU. - No. 2017116036/06; claimed. 04/05/2017; publ. 03/21/2018; bul. №9. 6 p.

12. Thermal calculation of boiler units (normative method). Izd-e 3rd, revised. and additional. St. Petersburg: NGO CKTI, 1998. 256 p.

Authors of the publication

Emil R. Saifullin – Kazan Federal University, Kazan, Russia

Viktor M. Larionov – Kazan Federal University, Kazan, Russia

Yuriy V. Vankov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Поступила в редакцию

16 января 2019 г.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ОБТЕКАЕМЫХ ТЕЛ

Т.М. Фарахов¹, А.Г. Лаптев²

¹ИВЦ «Инжехим», г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,

г. Казань, Россия

tvt_kgeu@mail.ru

Резюме: Рассмотрена двухслойная модель турбулентного пограничного слоя Прандтля и применение полученного на ее основе выражения для расчета коэффициента теплоотдачи, результаты которого хорошо согласуются с экспериментальными данными по средним значениям коэффициентов для различных тел. Показано определение параметров данного выражения для случая расчета локальных коэффициентов теплоотдачи на начальных участках каналов. Основными параметрами являются динамическая скорость, безразмерная толщина пограничного слоя и безразмерная толщина вязкого подслоя. На основе степенного и логарифмического профилей скорости получены выражения для расчета безразмерных параметров турбулентного пограничного слоя. Показано удовлетворительное согласование результатов расчетов локальных коэффициентов теплоотдачи для пластины и трубы. Представленный подход является теоретической основой для моделирования локальной теплоотдачи для тел более сложной формы, если известны коэффициенты трения.

Ключевые слова: локальная теплоотдача, пограничный слой, турбулентность, входной участок.

Благодарности: Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (№13.6384.2017/БЧ).

DETERMINATION OF LOCAL HEAT TRANSFER COEFFICIENTS AT THE ENTRANCE REGION OF STREAMLINED BODIES

T.M. Farakhov¹, A.G. Laptev²

¹Engineering-Promotional Center "Inzhekhim", Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

tvt_kgeu@mail.ru

Summary: Prandtl's two-layer model of the turbulent boundary layer is considered and the expression obtained through the use of the model is applied to calculate the heat transfer coefficient, calculations for which agree well with experimental data on mean values of the coefficients for various bodies. Determination of parameters of this expression is shown for the case of calculating local heat transfer coefficients in the entrance regions of the channels. The main parameters are dynamic velocity, dimensionless thickness of the boundary layer and dimensionless thickness of the viscous sublayer. Based on the power-law and logarithmic velocity profiles, expressions are obtained for calculating the dimensionless parameters of the

turbulent boundary layer. A satisfactory agreement of the results of calculations of local heat transfer coefficients for the flow over a flat plate and the pipe flow is shown. The presented approach represents a theoretical basis for modeling the local heat transfer for bodies of more complex shapes, if the friction coefficients are known.

Keywords: local heat transfer, boundary layer, turbulence, entry region.

Acknowledgments: The work was performed within the framework of the basic part of the state task in the field of scientific activity (№13.6384.2017/BCH).

For citation: Farakhov T.M., Laptev A.G. Determination of local heat transfer coefficients at the entrance region of streamlined bodies. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):22-26. (In Russ). DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-22-26.

Введение

Решение задач математического моделирования и повышения эффективности теплообменных процессов является важным и актуальным практически для всех отраслей промышленности и энергетики [1–4]. За последние годы опубликовано несколько монографий и учебных пособий [5–7].

При решении задач математического моделирования теплообменных процессов кроме средних коэффициентов теплоотдачи при обтекании различных тел относительно небольших разливов (например, на входных участках коротких каналов) необходим расчет локальных коэффициентов теплоотдачи. На входном участке происходит гидродинамическая стабилизация пограничного слоя в каналах, длина которых составляет от 20 до 50 диаметров трубы, в зависимости от числа Рейнольдса.

Целью данной работы является показать примеры расчетов локальных коэффициентов теплоотдачи на пластине и в трубе на основе применения модели пограничного слоя Прандтля.

Двухслойная модель турбулентного пограничного слоя Прандтля является наиболее простой в математическом описании, однако дает результаты по расчетам коэффициентов переноса незначительно отличающиеся от более сложных моделей (Кармана, Дайслера, Левича, Ханратти, Овена, Ван-Дрифта и др.).

На основе применения модели Прандтля получено выражения коэффициента теплоотдачи [8, 9]:

$$\alpha = \frac{\rho c_p u_*}{Pr^m \left[R_1 + \frac{1}{\chi} \ln(R_\delta / R_1) \right]}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К; Pr – число Прандтля; u_* – динамическая скорость, м/с; R_1 – безразмерная толщина вязкого подслоя (на пластине при стабилизированном течении $R_1=11,6$); $R_\delta = u_* \delta / \nu$ – безразмерная толщина пограничного слоя; δ – толщина пограничного слоя, м; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; $\chi=0,4$ – константа турбулентности; ρ – плотность среды, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость среды, Дж/кг К.

Выражение (1) дает удовлетворительные результаты расчетов средних коэффициентов теплоотдачи при различных условиях движения потоков в каналах [8, 9].

Ниже рассмотрено применение выражения (1) для расчетов локальных коэффициентов теплоотдачи.

Локальная теплоотдача от пластины

Первоначально рассмотрен пример обтекания пластины потоком при турбулентном стационарном режиме. Для этого необходимо определить основные параметры выражения (1) в зависимости от расстояния набегающего потока в продольном направлении пластины. Тогда запишем для пластины ($m=0,57$)

$$\alpha_x = \frac{\rho c_p u_{*x}}{\text{Pr}^{0,57} \left[R_{1x} + \frac{1}{\chi} \ln(R_{\delta x} / R_{1x}) \right]}. \quad (2)$$

Динамическую скорость выразим с применением локального коэффициента трения C_{fx} пластины:

$$u_{*x} = u_\infty \sqrt{C_{fx} / 2}, \quad (3)$$

где u_∞ – скорость внешнего потока, м/с.

Для пластины при $\text{Re}_x = u_\infty x / \nu$ от 10^5 до 10^6 $C_{fx} = 0,058 / \text{Re}_x^{0,2}$; где Re_x – число Рейнольдса; x – продольная координата, м.

Локальное значение толщины турбулентного пограничного слоя на пластине, как известно, имеет вид

$$\delta = \frac{0,37x}{\text{Re}_x^{0,2}}. \quad (4)$$

Тогда значение $R_{\delta x}$ из (3) и (4) запишется в форме

$$R_{\delta x} = 0,37 \text{Re}_x^{0,8} \sqrt{C_{fx} / 2}. \quad (5)$$

Безмерную толщину вязкого подслоя R_{1x} , как функцию координаты, найдем из степенного профиля скорости на пластине:

$$\frac{u}{u_*} = C(n) \left(\frac{yu_*}{\nu} \right)^{1/n} = C(n) (y^+)^{1/n}, \quad (6)$$

где при $40 < y^+ < 700$ $C(n) = 8,74$; $n = 7$.

В вязком подслое профиль скорости описывается линейной функцией

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* y}{\nu}. \quad (7)$$

На границе вязкого подслоя функции (6) и (7) имеют одинаковое значение:

$$R_1 = \frac{u_* \delta_1}{\nu} = C(n) \left(\frac{u_* \delta_1}{\nu} \right)^{1/n}. \quad (8)$$

Значение $C(n)$ можно определить из профиля скорости (6) при $y = \delta$ и $u = u_\infty$, имеем

$$\frac{u_\infty}{u_*} = C(n) R_\delta^{-1/n}. \quad (9)$$

Тогда

$$C(n) = \frac{u_\infty}{u_*} R_\delta^{-1/n}. \quad (10)$$

В результате из (8)–(10) получим при $n=7$ локальное значение, где $u_{*x} = u_\infty \sqrt{C_{fx} / 2}$ (3), тогда имеем

$$R_{1x} = \left(\frac{2}{C_{fx}} \right)^{7/12} R_{\delta x}^{-1/6}. \quad (11)$$

Расчеты показывают, что значение (11) практически не меняется и равно $R_{1x} = 12,4$, что близко к значению $R_1 = 11,6$ в теории пограничного слоя. Вероятно, что небольшое расхождение связано с погрешностью аппроксимации профиля скорости степенной функцией. Следовательно, можно принять $R_{1x} = R_1 = 11,6$.

Профиль скорости в турбулентной области пограничного слоя также описывается логарифмической функцией:

$$\frac{u}{u_*} = 2,5 \ln \frac{u_* y}{\nu} + 5,5. \quad (12)$$

На границе вязкого подслоя линейный профиль скорости и логарифмический принимают одинаковое значение, т.е. при $y = \delta_1$: $u_1 / u_* = R_1$ и

$$R_1 = 2,5 \ln R_1 + 5,5. \quad (13)$$

Из данного выражения следует постоянное значение $R_1 = 11,63$.

Локальный коэффициент теплоотдачи на пластине вычисляется по известному критериальному выражению [1]

$$Nu_x = 0,03 Re_x^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (14)$$

где $Nu_x = \alpha_x x / \lambda$ – локальное число Нуссельта; λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/м К.

Выражение (2) запишем в безразмерной форме с u_{*x} (3)

$$Nu_x = \frac{Re_x \sqrt{C_{fx}} / 2 Pr^{0,43}}{11,6 + 2,5 \ln(R_{\delta x} / 11,6)}. \quad (15)$$

Из расчетов по выражениям (14) и (15) при $Re_x = 2 \cdot 10^5$ имеем по выражению (14) $Nu_x = 513,6$, по (15) $Nu_x = 502,5$ (при $Pr = 1$).

Расхождение около 3%. При $Re_x = 10^6$, соответственно, получаем $Nu_x = 1861$ и $Nu_x = 1882$, расхождение около 2%.

Таким образом, доказана адекватность выражения Nu_x (15) с параметрами (5) и $R_1 = 11,6$ при моделировании локальной теплоотдачи на пластине при турбулентном движении потока.

Теплоотдача на начальном участке трубы

При турбулентном движении однофазного потока в трубе длина участка гидродинамической стабилизации составляет $l_{CT} < 50d$, где d – диаметр трубы [1, 10]. На входном участке скорость потока на оси канала изменяется от среднего значения u_{cp} на входе до значения u_{max} за участком гидродинамической стабилизации. Учитывая, что толщина турбулентного пограничного слоя (4) зависит от продольной координаты в степени $\delta \sim x^{4/5}$ приближенно скорость потока на оси найдем из выражения

$$u_{max(x)} = u_{cp} + u_m(x) (x / l_{CT})^{4/5}, \quad (x \leq l_{CT}), \quad (16)$$

где при $x=0$ имеем $u_{max} = u_{cp}$ (вход в трубу); при $x = l_{CT}$, $u_{max} = u_{cp} + u_m$, где $u_m = 4u_*$; при $0 < x < l_{CT}$, $u_m = 4u_*(x)$ – скорость на оси, м/с.

В литературе отсутствует функция для коэффициента трения на начальном участке трубы, поэтому в первом приближении при $x < l_{CT}$ используем выражение для пластины C_{fx} и динамическую скорость в формуле (3).

Значение $R_{\delta x}$ вычислим по формуле (5), где число Рейнольдса будет скоростью $u_{\infty} = u_{\max}(x)$ (16), аналогично при вычислении C_{fx} .

Также и логарифмического профиля (12) можно получить локальное значение $R_{\delta x}$ на начальном участке трубы, при $u = u_{\infty}$ и $y = \delta$ имеем

$$R_{\delta x} = \exp \left[0,4 \left(\frac{u_{cp} + 4u_{*x}}{u_{*x}} \right) - 5,5 \right]. \quad (17)$$

Длину участка гидродинамической стабилизации в круглой трубе можно приближенно оценить из выражения (4) при $\delta \approx R$ и $u_{\infty} \approx 1,15u_{cp}$. Получим

$$l_{CT} = \left(\frac{R}{0,37} \right)^{5/4} \left(\frac{1,15u_{cp}}{\nu} \right)^{1/4}, \quad (18)$$

где R – радиус трубы, м.

Расчет показывает, что отношение локального коэффициента теплоотдачи α_x (2) к среднему α при $x/d = 1,0$ равно $\alpha_x/\alpha = 1,35$ ($Re_d = 5 \cdot 10^4$). В монографиях [1, 7, 10] приведено значение $\alpha_x/\alpha = 1,34$. Расчеты α_x/α удовлетворительно согласуются с известными поправками, учитывающими начальный участок в трубе при различных числах Рейнольдса и, соответственно, длины начального участка (18).

Выводы

Рассмотрено применение выражения для коэффициента теплоотдачи, полученного ранее авторами по модели Прандтля, на случай локальной теплоотдачи на входных участках каналов. Определены локальные параметры пограничного слоя для пластины и трубы. Показано согласование результатов расчетов локальных коэффициентов теплоотдачи с известными результатами. Представленный подход является теоретической основой для моделирования локальной теплоотдачи для тел с различной геометрией обтекаемых поверхностей.

Литература

1. Хрусталева Б.М. и [др.] Тепло и массообмен. Ч.1.; под ред. А.П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2007. 606 с.
2. Молчанов А.М., Быков Л.В., Янышев Д.С. Трехпараметрическая модель турбулентности для высокоскоростных течений // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91, №3. С. 720–727.
3. Minakov A.V., Guzei D.V., Meshkov K.N., Popov I.A. Experimental study of turbulent forced convection of nanofluid in channels with cylindrical and spherical hollows // International journal of heat and mass transfer. 2017. Т. 115. С. 915–925.
4. Leont'ev A.L., Kuzma-Kichta Y.A., Popov I.A. Heat and mass transfer and hydrodynamics in swirling flows (review) // Thermal Engineering. 2017. Т.64, № 2. С. 111–126.
5. Кудинов И.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущихся жидкостях. СПб.: Лань, 2015. 208 с.
6. Маринюк Б. Расчеты теплообмена в аппаратах и системах низкотемпературной техники. М.: Машиностроение, 2015. 272 с.
7. Рудской А.И. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущихся жидкостях. СПб.: Лань, 2015. 208 с.

8. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Фарахов Т.М. Тепло- и массоотдача в возмущенных турбулентных пограничных слоях // Труды Академэнерго. 2016. №1. С. 53–71.

9. Лаптев А.Г., Башаров М.М. Математическая модель и расчет коэффициентов теплоотдачи в шероховатых каналах при турбулентном режиме // Инженерно-физический журнал. 2015. Т.88, №3. С. 656–662.

10. Михеев М.А., Михеев И.М. Основы теплопередачи. М.: «Энергия», 1977. 344 с.

Авторы публикации

Фарахов Тимур Мансурович – канд. техн. наук, ведущий инженер ООО ИВЦ «Инжехим».

Лаптев Анатолий Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология воды и топлива» (ТВТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Reference

1. Khrustalev B.M. and [et al.] Heat and mass transfer. Minsk: BNTU, 2007. 606 с.
2. Molchanov A. M., Bykov L. V., Yanyshv D. S. Three-parameter turbulence model for high-speed flows // Engineering-physical journal. 2018. Vol.91. №. 3. P. 720–727.
3. Minakov A.V., Guzei D.V., Meshkov K.N., Popov I.A. Experimental study of turbulent forced convection of nanofluid in channels with cylindrical and spherical hollows // International journal of heat and mass transfer. 2017. Vol. 115. P. 915–925.
4. Leont`ev A.L., Kuzma-Kichta Y.A., Popov I.A. Heat and mass transfer and hydrodynamics in swirling flows (review) // Thermal Engineering. 2017. Vol.64. № 2. P. 111–126.
5. Kudinov I.V. Mathematical modeling of hydrodynamics and heat transfer in moving fluids. SPb. : Lan, 2015. 208 p.
6. Marinyuk B. Calculations of heat transfer in devices and systems of low-temperature equipment. M.: Mashinostroenie, 2015. 272 p.
7. Rudskoy A.I. Mathematical modeling of hydrodynamics of heat transfer in moving liquids. Spb: Lan, 2015. 208 p.
8. Laptev A.G., Basharov M.M., Farakhov T.M. Heat and mass transfer in a perturbed turbulent boundary layers // Trudy Akademenergo. 2016. №1. P. 53–71.
9. Laptev A.G., Basharov M.M. Mathematical model and calculation of heat transfer coefficients in rough channels in turbulent regime // Engineering-physical journal. 2015. Vol. 88, №. 3. P. 656–662.
10. Mikheev M.A., Mikheev I.M. Heat transfer basics. M.: Energy, 1977. 344 p.

Author of the publication

Timur M. Farakhov – Engineering-Promotional Center "Inzhekhim", Kazan, Russia

Anatoly G. Laptev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Поступила в редакцию

16 октября 2018 г.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА СЖАТОГО ВОЗДУХА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНО-АККУМУЛИРУЮЩЕЙ СТАНЦИИ

В.С. Степанов, Т.Б. Степанова, Н.В. Старикова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск,
Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-2649-5318>, Natalia-starikova@yandex.ru

Резюме: Статья посвящена термодинамическому анализу процессов, происходящих в накопителях энергии сжатого атмосферного воздуха. В качестве инструмента для исследования процессов сжатия-расширения предлагается метод составления и анализа эксергетического баланса. В результате могут быть оценены основные показатели – потенциал сжатого воздуха и эффективность всех элементов схемы и воздушно-аккумулирующей станции (ВАЭС) в целом. Процедура исследования показана на примере адиабатической ВАЭС. Рассчитаны зависимости конечной температуры, удельной эксергии и работы сжатия на 1 тыс. м³ атмосферного воздуха от степени его сжатия. ВАЭС такого типа по объективным причинам не может иметь высокую термодинамическую эффективность. Однако она обладает рядом экономических преимуществ, а также и хорошо совместима с возобновляемыми источниками энергии, например, с ветроэнергетическими установками. Для повышения КПД процесса необходимо преобразовать тип ВАЭС в неадиабатический, что потребует изменения схемы и режима работы ее элементов. При этом сжатие в компрессоре должно производиться с максимально возможным отводом тепла, а процесс расширения в ГТУ открытого типа должен осуществляться с подводом тепла.

Ключевые слова: накопители энергии, воздушно-аккумулирующие электростанции, термодинамические исследования, эксергетический метод.

EVALUATION THE ENERGY POTENTIAL OF COMPRESSED AIR FOR DETERMINING EFFICIENCY OF AIR-ACCUMULATING ELECTRIC

V.S. Stepanov, T.B. Stepanova, N.V. Starikova

Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2649-5318>, Natalia-starikova@yandex.ru

Abstract: The thermodynamics analysis of processes flowing into the storages of compressed air energy are considered in the paper. The exergy balance has been propose as the instrument for study. The main indices have been estimate: the compressed air potential, efficiencies for all elements of the scheme and air-accumulating electric station (AAES) as a whole. The study procedure demonstrated on the example of adiabatic AAES. The relation of final temperatures, specific exergy and compression work per 1000 m³ of atmospheric air to compression ratio are determined. On the base, it can concluded that adiabatic AAES has not high efficiency, but it has some advantages: simple scheme, low investment, and combined well with renewable energy sources, for instance, wind-driven plants. To raise the efficiency of an adiabatic AAES, it should

be transform to diabatic type. For that it is required modify the scheme and work regime of its elements, and combined it in complex with gas turbine plants.

Keywords: energy storages, air accumulating electric station, thermodynamics analysis, exergy method

For citation: Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Evaluation the energy potential of compressed air for determining efficiency of air-accumulating electric. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21 (3-4):27-37. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-27-37.

Введение

В последние годы во многих странах существенно возрос интерес к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), использование которых не нарушает естественный баланс энергии нашей планеты. К возобновляемым источникам энергии относят запасы, которые восполняются естественным образом и в обозримой перспективе являются практически неисчерпаемыми. В первую очередь к ним относятся солнечная радиация, энергия ветра, энергия рек и др. [1–3].

Однако практически все источники возобновляемой энергии, как и подобает естественным процессам, имеют вероятностный режим выдачи энергии в течение суток, времени года, периода времени. Причем режим выдачи этой энергии не совпадает, а часто является противоположным требованиям энергосистемы с точки зрения покрытия графика нагрузки потребителей. То есть эти источники не обладают постоянством выдаваемой мощности, не подлежат регулированию, не могут подстроиться к режиму энергопотребления энергосистемы. Иначе говоря, использование ВИЭ сопряжено с целым рядом трудностей, обусловленных вероятностным характером выдачи и, следовательно, сложностью их встраивания в режим работы традиционных энергосистем.

В настоящее время активно продвигается новая концепция – строительство интеллектуальных энергосистем будущего, получившая название *Smart Grid*. Эта концепция предусматривает достижение таких важных целей: широкое использование современных средств контроля и управления, включая интернет-технологии, интеграцию в энергосистему источников, работающих на возобновляемых энергоресурсах, а также разного рода накопителей энергии, чтобы повысить надежность и экономичность производства электроэнергии и ее качество.

Известно, что аккумуляция энергии можно осуществлять в виде потенциальной энергии того или иного агента (энергоносителя), например: воды, используя её на гидроаккумулирующих станциях (ГАЭС), либо сжатого газа (воздуха), подавая его в бескомпрессорные газовые турбины, установленные на воздушно-аккумулирующих электростанциях (ВАЭС) различного типа.

Накапливать энергию сжатого воздуха можно путём закачивания его компрессором высокого давления в специально созданные резервуары или подземные естественные и искусственные емкости. По мере надобности сжатый воздух из хранилища подаётся в соответствующий элемент ВАЭС.

Существует два типа накопителей сжатого воздуха, которые отличаются разным расположением хранилища. Первый из них называется *системой наземного хранения*, а другой – *подземного хранения*. Каждый из них имеет свои специфические требования и сферу применения. В настоящее время подземные резервуары сжатого воздуха экономически целесообразно применять в составе воздушно-аккумулирующих электростанций мощностью от 100 кВт и более, а наземные хранилища могут работать в составе небольших электростанций мощностью от 10 до 100 кВт.

В качестве наземных накопителей сжатого воздуха могут быть использованы трубопроводы природного газа, по тем или иным причинам оказавшиеся незадействованными. В составе ВАЭС небольшой мощности могут использоваться специально построенные резервуары для хранения сжатого воздуха.

Более экономичными являются подземные хранилища сжатого воздуха, в качестве которых целесообразно использовать естественные пустоты в земной коре, соляные пещеры, отработанные месторождения природного газа и т. д.

Накопители энергии сжатого воздуха (НЭСВ) позволяют сохранять большие количества (объёмы) энергии на продолжительное время при относительно низкой стоимости. Поэтому их широкое использование в интеллектуальных энергосистемах будущего (*Smart Grid*) имеет весьма хорошие перспективы с учетом дальнейшего повышения энергетической эффективности самих накопителей.

Совершенствование процессов сжатия и расширения воздуха для повышения КПД НЭСВ возможно лишь в том случае, когда имеется представление о тех сложных процессах, которые протекают в компрессорах, и известен характер изменения параметров воздуха и энергетических преобразований в других элементах ВАЭС [1].

Термодинамические основы исследования процессов сжатия-расширения воздуха [4, 5]

Для описания характера изменения параметров воздуха в таком процессе используется термодинамическая функция политропы $pV^n = \text{idem}$ с разными значениями её показателя n .

Всё многообразие процессов сжатия и расширения воздуха принято подразделять на два типа. Процессы, осуществляемые без обмена теплотой сжимаемого/расширяющегося агента с окружающей средой, т. е. при $dq = 0$ и $dS = 0$, называются *адиабатическими* или *изоэнтропными*. Показатель политропы таких процессов $n = k$, где k – показатель адиабаты, равный отношению изобарной C_p и изохорной C_v теплоемкостей воздуха,

$k = \frac{C_p}{C_v}$. Все другие процессы, протекающие с обменом теплотой, называют *неадиабатическими* или *диабатическими**.

Процессы сжатия воздуха могут осуществляться с отводом теплоты от сжимаемого агента, показатель политропы для них $n < k$. При этом если процесс сжатия газа происходит с полным отводом теплоты, т. е. процесс протекает при постоянной начальной температуре $T_1 = \text{idem}$, то он называется *изотермическим*. Показатель политропы таких процессов $n = 1$.

В общем случае для неадиабатических процессов сжатия воздуха, осуществляемых с отводом теплоты, показатель политропы $n < k$, а при подводе теплоты – $n > k$. Значения показателя политропы для неадиабатических процессов расширения при подводе тепла $n < k$, а при отводе тепла – $n > k$.

На рис. 1 показана зависимость параметров состояния агента в идеальном компрессоре от значения показателя политропы, описывающая разные процессы сжатия воздуха. Диаграмма отображает процесс сжатия воздуха в поршневом компрессоре, имеющем идеальные клапаны, без мёртвого пространства. Работа, затрачиваемая компрессором за один цикл, равна площади под кривой, описываемой политропой с соответствующим показателем n .

Как видно на рис. 1, эта работа имеет минимальное значение при осуществлении процесса сжатия воздуха с полным отводом от него выделяемого тепла, т. е. по изотерме с показателем политропы $n = 1$ (площадь 1-2-3-4-1). Реализовать такой процесс практически невозможно.

* В отечественной литературе этот термин обычно не применяется.

Также невозможно реализовать процесс сжатия по адиабате с показателем политропы $n = k$, поскольку не представляется возможным создать компрессор, в котором бы отсутствовал теплообмен между сжимаемым агентом и окружающей средой. Работа адиабатического сжатия воздуха (площадь $1-2'-3-4-1$) больше работы изотермического сжатия.

Реально осуществимые процессы сжатия воздуха являются неадиабатическими (диабатическими) с показателями политропы из областей $1 < n < k$ и $n > k$. Поэтому неудивительно, что адиабатический процесс сжатия/расширения газа принимается за эталонный, а характеристики сжимаемого агента используются как предельные.

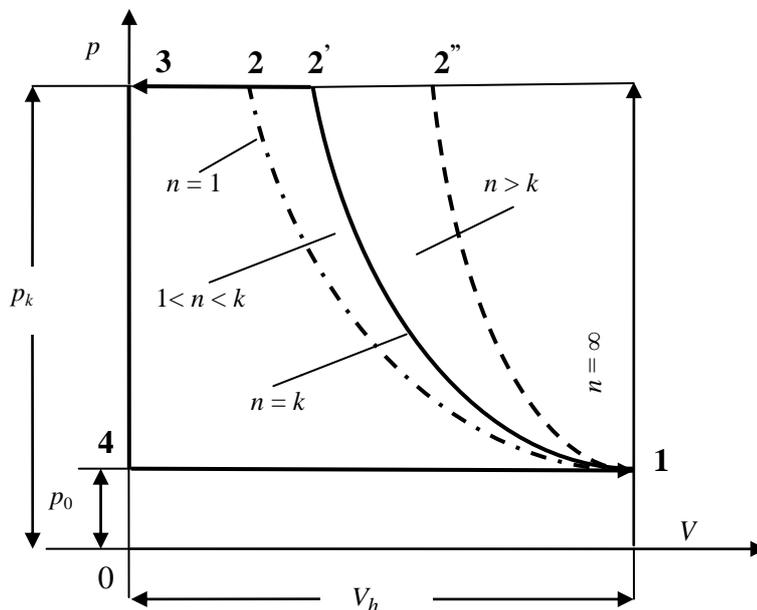


Рис. 1. Диаграмма процессов сжатия воздуха в p - V координатах

Рассмотрим диаграмму процессов идеального компрессора, показанную на рис. 1. Процесс всасывания воздуха $1-4$ происходит при постоянном давлении $p_0 = \text{idem}$. Процесс сжатия осуществляется по обратимой адиабате $1-2$, описываемой уравнением $pV^k = \text{idem}$. Процесс выталкивания воздуха $2-3$ происходит при постоянном давлении $p_k = \text{idem}$. Работа, затрачиваемая компрессором за цикл, равна площади $1-2-3-4-1$. Она характеризует термомеханическую эксергию сжатого воздуха и может быть определена по формуле

$$l = e_{\text{TM}} = \int_1^2 V dp, \quad (1)$$

где V – объём цилиндра; dp – бесконечно малое изменение давления.

Из уравнения адиабаты $p_1 V_1^k = p V^k$ следует:

$$V^k = V_1 \frac{p_1^{1/k}}{p^{1/k}}. \quad (2)$$

В результате подстановки и интегрирования получим выражение для определения работы адиабатического сжатия воздуха:

$$l = e_{\text{тм}} = \frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (3)$$

Таким образом, в системах накопления и использования сжатый воздух постоянно подвергается процессам сжатия и расширения. Однако о том, какие энергетические преобразования происходят при этом с воздухом, как меняется его энергетический потенциал, как оценить этот потенциал, – в среде специалистов нет единого мнения в использовании понятий энергия или эксергия. В данной статье используются понятия эксергия, эксергетический баланс [6–9].

Уравнение энергетического и эксергетического балансов обратимых процессов сжатия и расширения для единицы массы любого газа имеют вид:

$$l = h_2 - h_1 + q \quad (4)$$

и

$$l = e_2 - e_1 + e_q = e_2 - e_1 + q \cdot \tau_e. \quad (5)$$

Здесь $\tau_e = \frac{T - T_0}{T}$ – коэффициент работоспособности теплоты, где T – произвольная температура; T_0 – температура окружающей среды.

Процессы могут проводиться при разном соотношении температур T и T_0 . Интерес представляет случай сжатия при $T = T_0$, когда $e_q = 0$. В этом случае $l = e_2 - e_1$, т. е. работа изотермического сжатия (расширения) при температуре окружающей среды равна разности значений эксергии газа в начальном и конечном состояниях.

Из уравнения (4) следует, что изменение энергии газа (в поточном процессе энергия газа измеряется энтальпией) равно разности между затраченной работой l и отведённым теплом q :

$$h_2 - h_1 = l - q. \quad (6)$$

Для идеального газа эта величина равна нулю, поскольку его эксергия не зависит от давления, и отведённое в процессе сжатия тепло q в точности равно затраченной работе l .

В общем случае для реального газа величина $q \neq l$, и значение разности $h_2 - h_1$ определяется величиной и знаком изотермического эффекта Джоуля–Томсона рассматриваемого газа Δh_T при данной температуре, т. е.

$$\Delta h_T = h_1 - h_2. \quad (7)$$

Величина и знак эффекта Джоуля–Томсона определяется соотношением между работой газа и работой сил внешнего давления, а также свойствами самого газа, в частности размером его молекул и их взаимодействием.

Для таких газов, как воздух, кислород, азот при T_0 и давлениях до 30 МПа величины Δh_T больше нуля (положительный эффект Джоуля–Томсона) и, следовательно, энергия таких сжатых газов меньше, чем несжатых ($h_2 < h_1$).

Для других газов (гелий, неон, водород) при T_0 $\Delta h_T < 0$ (отрицательный эффект Джоуля–Томсона), и энергия сжатого газа на несколько процентов больше, чем расширенного. Однако эта разница очень мала по сравнению с величиной работы, затрачиваемой на сжатие газа.

Таким образом, величина энергии сжатого газа незначительно отличается от энергии несжатого газа, и в большинстве случаев меньше её.

В тех случаях, когда изотермическое сжатие происходит при $T \neq T_0$, величина e_q в уравнении (4) не равна нулю.

Энергетический баланс процесса сжатия в общем случае можно записать так:

$$l = q - \Delta h_T, \quad (8)$$

а эксергетический баланс –

$$l = e_2 - e_1 + e_q = \Delta e + q \cdot \tau_e . \quad (9)$$

Подставляя значение q из уравнения (8) в уравнение (9) и раскрывая значение τ_e , можно получить:

$$l = \Delta e \frac{T}{T_0} + \Delta h_T \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) = (\Delta e + \Delta h_T) \frac{T}{T_0} - \Delta h_T \quad (10)$$

и

$$q = (\Delta e + \Delta h_T) \frac{T}{T_0} . \quad (11)$$

Для идеального газа величина изотермического эффекта Джоуля-Томсона $\Delta h_T = 0$. В этом случае выражения (10) и (11) сводятся к следующей формуле:

$$l = q = \Delta e \frac{T}{T_0} . \quad (12)$$

Для того чтобы оценить величину энергетического потенциала сжатого воздуха при разных его давлениях, нами были выполнены расчёты значений термомеханической эксергии 1000 м³ атмосферного воздуха для соответствующих давлений. В расчётах принималось, что эксергия воздуха равна работе его адиабатического сжатия в идеальном компрессоре, которая вычислялась по выражению (3).

Результаты расчётов для диапазонов давлений от 3 до 90 атм приведены в табл. 1. Полученную зависимость можно использовать при решении ряда конкретных задач, например: для оптимизации состава виртуальных электростанций с применением энергии накопителей сжатого воздуха или при выборе состава генерирующих источников автономных энергосистем и оптимизации режимов их работы с учётом неравномерности графика нагрузки в рассматриваемой системе.

Кроме того, значения термомеханической эксергии сжатого воздуха позволяют определить энергетический потенциал воздуха, поступающего в хранилище, при известных значениях давления p_1 и p_2 . Для известного объёма V он может быть найден как разница величин эксергии при соответствующих давлениях, т. е.

$$\Pi_\phi = (e_2 - e_1) \cdot V . \quad (13)$$

Очевидно, что потенциал того же объёма воздуха, поступающего из хранилища в газовую турбину, будет таким же. Например, если при подаче компрессором 100 тыс. м³ воздуха давление в хранилище изменилось с 80 до 90 атм, то энергетический потенциал этого объёма воздуха составит

$$\Pi_\phi = (257,80 - 245,98) 100 = 1182 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Поскольку энергетический потенциал сжатого воздуха – это есть работа сжатия, то, зная эту величину, можно определить количество электрической энергии, затраченной на привод компрессора при сжатии им воздуха заданного объёма. Это значение можно найти по выражению

$$W_{\text{эл}}^{\text{к}} = \frac{\Pi_\phi}{\eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{эд}}} , \quad (14)$$

где $\eta_{\text{к}}$ – КПД компрессора; $\eta_{\text{эд}}$ – КПД электродвигателя.

Аналогично можно определить величину электрической энергии, которую можно получить с помощью газотурбинного блока:

$$W_{\text{эл}}^{\text{к}} = \Pi_\phi \cdot \eta_{\text{ГТ}} \cdot \eta_{\text{ЭГ}} ,$$

где $\eta_{ГТ}$ – КПД газовой турбины; $\eta_{ЭГ}$ – КПД электрического генератора.

Полученные величины термомеханической эксергии воздуха можно использовать для оценки энергетического потенциала сжатого воздуха накопителей, применяемых в различных схемах и при различных режимах работы ВАЭС.

Принципиальные схемы и оборудование ВАЭС

Как было отмечено выше, во время фазы сжатия выделяется тепло, т. е. сжатый воздух нагревается. Чем выше степень повышения давления воздуха β , тем выше его конечная температура T_K :

$$T_K = T_0 \left[\beta^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (15)$$

В зависимости от использования тепла, выделяемого при сжатии воздуха, различают две типовые схемы ВАЭС – адиабатическую и неадиабатическую. Рассмотрим особенности построения адиабатической ВАЭС, схема которой показана на рис. 2.

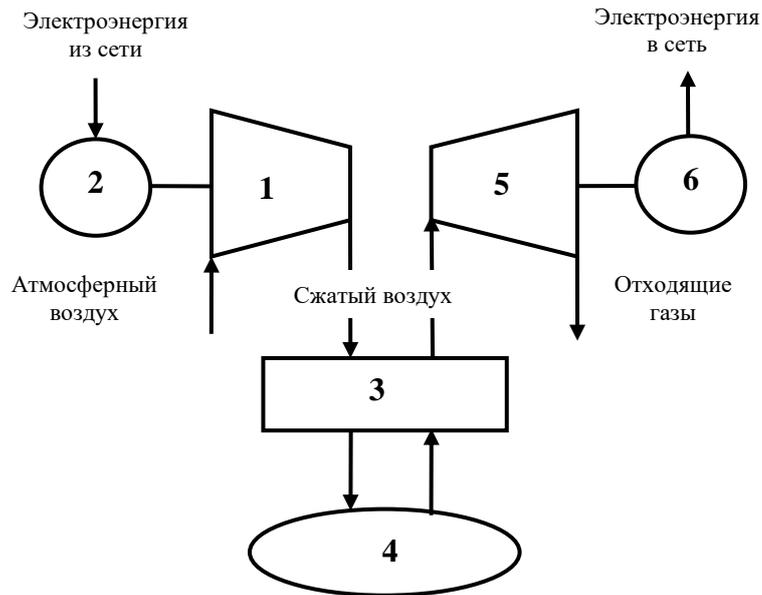


Рис. 2. Принципиальная схема адиабатической ВАЭС: 1 – компрессор; 2 – электродвигатель; 3 – теплоаккумулятор-теплообменник; 4 – накопитель сжатого воздуха; 5 – бескомпрессорная газовая турбина (БГТ); 6 – электрический генератор

В состав ВАЭС включены: накопитель сжатого воздуха, компрессор с приводом от электродвигателя, бескомпрессорная газовая турбина и электрический генератор, расположенный на одном валу с турбиной. Принцип работы ВАЭС состоит в следующем. Воздух, сжимаемый в компрессоре, адиабатически, в зависимости от степени повышения давления β , нагревается до соответствующей температуры T_K . С увеличением β повышается температура выходящего из компрессора сжатого воздуха, что, в свою очередь, приводит к увеличению работы, затрачиваемой на привод компрессора. Для получения зависимости конечной температуры от степени сжатия воздуха были проведены расчеты по формуле (15).

В свою очередь, повышение T_k приводит к увеличению работы сжатия, значения которой были определены по формуле (12). Результаты этих расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1
Зависимость конечной температуры, удельной эксергии и работы сжатия 1 тыс м³ атмосферного воздуха от степени повышения его давления

$\beta = \frac{P_k}{P_0}$	Конечная температура сжатого воздуха T_k	Термомеханическая эксергия e_{TM}		Работа сжатия $I_{сж}$	
		кДж	кВт·ч	кДж	кВт·ч
3	401,24	130,44	36,21	178,5	49,58
5	464,23	206,44	57,22	327,0	90,83
10	565,97	330,88	91,9	639,25	177,58
20	689,43	478,29	132,86	1126,36	312,88
30	774,11	580,45	161,24	1533,54	425,92
40	840,62	660,69	183,52	1896,00	526,8
50	895,91	727,5	202,08	2224,7	617,97
60	943,81	785,12	218,09	2529,63	702,69
70	986,31	836,38	232,39	2814,42	781,7
80	1024,66	882,69	245,13	3085,0	856,94
90	1060,32	925,11	256,98	3349,82	930,3

Полученные результаты позволяют определить энергетический потенциал сжатого воздуха, а значит дают возможность составить эксергетический баланс соответствующих элементов схемы и ВАЭС в целом и определить их КПД.

В рассмотренной схеме для повышения КПД накопителя энергии сжатого воздуха обычно предусматривается утилизация его тепла после компримирования с помощью теплообменника-аккумулятора, через который сжатый воздух проходит, прежде чем попасть в накопитель. Сжатый воздух из накопителя подается в бескомпрессорную турбину предварительно подогретым за счет тепла, запасенного в теплообменнике. Однако в этой схеме теплота сжатого воздуха, поступающего в турбину, может иметь относительно невысокую температуру, существенно меньшую T_k . Поэтому КПД такой ВАЭС будет не очень высоким. Это не означает, что применение адиабатической ВАЭС никогда не имеет смысла. Как видно из рис. 2, такая схема проста по набору оборудования (отсутствует компрессор для газовой турбины), а следовательно, не требует больших капиталовложений, т. е. имеет экономические преимущества.

Опыт эксплуатации на металлургических заводах газовых утилизационных бескомпрессорных турбин (ГУБТ), работающих на избыточном давлении доменного газа, убедительно показывает их технико-экономическую эффективность. Удельные капитальные вложения на 1 кВт установленной мощности газорасширительной станции (ГРС) с ГУБТ на 35 % меньше, а эксплуатационные издержки на выработку 1 кВт·ч электроэнергии на ней – на 45 % меньше по сравнению с вариантом ТЭЦ [9, 10].

Учитывая изложенное выше в теоретическом разделе, для того, чтобы повысить энергетическую эффективность адиабатической ВАЭС, нужно принципиально изменить её схему. Сжатие в компрессоре должно осуществляться с максимально возможным отводом выделяемого тепла (приближая процесс к изотермическому), а процесс расширения в турбине осуществляться с подводом теплоты (приближая процесс к адиабатическому).

Принципиальная схема такой неадиабатической ВАЭС показана на рис. 3.

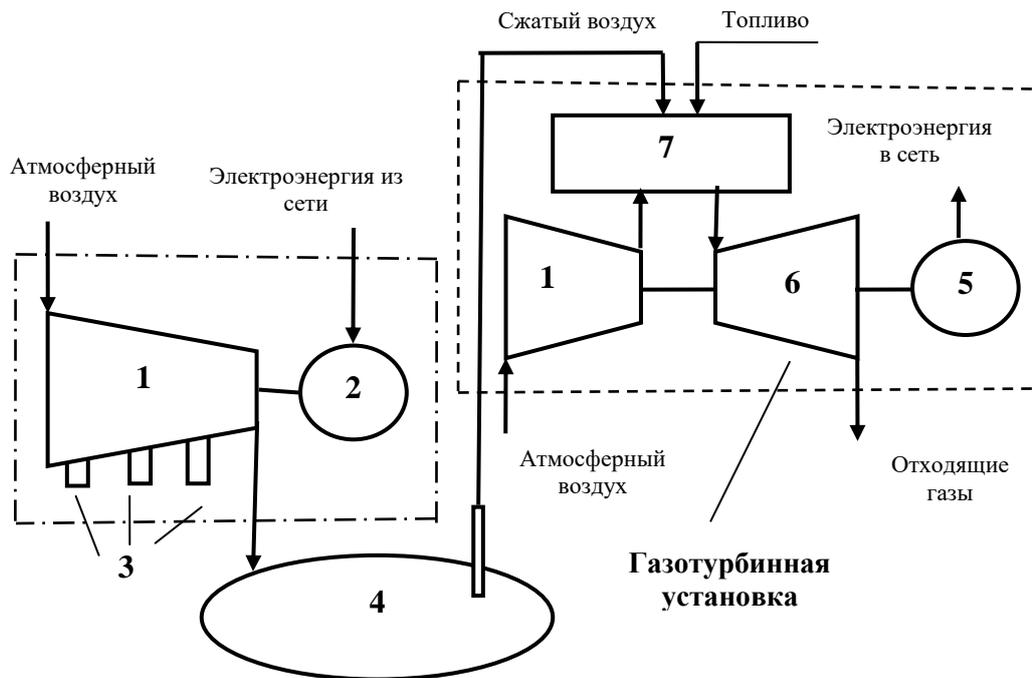


Рис. 3. Принципиальная схема неадиабатической ВАЭС в комбинации с ГТУ:
 1 – компрессор; 2 – электродвигатель; 3 – кулеры; 4 – накопитель сжатого воздуха; 5 – генератор; 6 – турбина; 7 – камера сгорания

На схеме показано, что для отвода теплоты, выделяемой при сжатии воздуха, компрессор оснащён кулерами. Для повышения эффективности использования энергии сжатого воздуха он направляется не в бескомпрессорную газовую турбину, а в схему обычной газотурбинной установки (ГТУ) открытого типа. Такая ГТУ в своём составе имеет камеру сгорания топлива (газообразного или жидкого), продукты сгорания которого направляются в газовую турбину (ГТ). ГТ своим валом соединена с валом компрессора и электрического генератора. Для сжигания топлива в камеру сгорания подаётся сжатый воздух от собственного компрессора. В общем случае ГТУ может иметь любую схему и работать в автономном режиме, в том числе и в режиме когенерации.

В сочетании ГТУ с накопителем энергии сжатого воздуха, сжатый воздух из хранилища подаётся в камеру сгорания топлива, замещая воздух и работу его сжатия в собственном компрессоре газотурбинной станции. Вследствие этого выработка ГТУ существенно увеличивается. Эффективность работы подобной комбинации ВАЭС + ГТУ может быть повышена путём использования теплоты выходящих из турбины газов (около 600–700 °С). Это тепло можно использовать для нагрева сжатого воздуха перед подачей его в камеру сгорания, что позволит уменьшить количество сжигаемого топлива, а следовательно, уменьшить негативное воздействие объекта на окружающую среду.

Возможен и другой путь использования этого тепла, организовав на ГТУ производство побочной продукции – горячей воды или пара (режим когенерации). Это также ведёт к повышению энергетической эффективности комплекса и снижению вредных выбросов в окружающую среду.

Работающая по схеме (показанной на рис. 3) неадиабатическая (диабатическая) ВАЭС мощностью 290 МВт эксплуатируется в Германии с 1978 года. Она имеет такие характеристики: фаза закачки воздуха в хранилище длится 8 часов; для сжатия воздуха объёмом 300 тыс. м³ от 46 до 72 атм используется компрессор с электрическим двигателем

мощностью 60 МВт. Во время фазы разрядки станция выдаёт в систему в течение 2 часов мощность 290 МВт. При этом на каждый выданный 1 кВт·ч электроэнергии она дополнительно потребляет 0,8 кВт·ч электроэнергии и 1,6 кВт·ч энергии природного газа.

Используя приведенные характеристики комплекса, недостаточные для составления его полного энергетического баланса, построенного на использовании 1-го и 2-го начал термодинамики [6, 8], авторы попытались всё же оценить эффективность его работы, т. е. определить его КПД. При этом величина накопленной эксергии (потенциал) сжатого воздуха определялась по изложенной выше методике. Как видно из табл. 2, величина достигнутого КПД комплекса составила $\eta_{\text{компл}} = 29,6\%$.

Таблица 2

Основные энергетические характеристики комплекса, сочетающего неадиабатическую ВАЭС и газотурбинную установку (реально существующая схема)

Потребляет	Выдает
1. Привод компрессора *(ЭД) $W_{\text{к}} = \frac{N_{\text{д}}}{\eta_{\text{д}} \eta_{\text{к}}} t_3 = \frac{60}{0,93 \cdot 0,85} \cdot 8 = 607,6 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	1*. Генерация электроэнергии в систему $W_{\text{ген}} = P_{\text{м}} \cdot t_{\text{разр}} = 290 \cdot 2 = 580 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$
2. Дополнительное потребление электроэнергии $W_{\text{доп}} = W_{\text{ген}} \cdot 0,8 = 580 \cdot 0,8 = 464 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	2*. Накопленная эксергия (потенциал) сжатого воздуха $\Pi_{\text{сж}} = (e_2 - e_1) \cdot V_{\text{в}} = (235 - 195) \cdot 300 = 12 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$
3. Дополнительное потребление природного газа $W_{\text{доп газ}} = W_{\text{ген}} \cdot 1,6 = 928 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	
Итого: 1999,6 МВт·ч	$\eta_{\text{компл}} = \frac{592}{1999,6} = 0,296$

Как отмечалось выше, энергетическую эффективность комплекса можно существенно повысить, если изменить его состав путем замены привода компрессора от электродвигателя на привод от ветроэнергетической установки (ВЭУ), что позволит исключить эту статью потребления электроэнергии из сети. В этом случае КПД комплекса может составить $\eta_{\text{компл}} = 42,5\%$ (табл. 3).

Что касается использования теплоты уходящих газов ГТУ, то для оценки ее влияния на эффективность комплекса не хватает необходимой информации. Оценочным расчётом была определена величина эксергии утилизированной теплоты газов, которая составила $E_q = 23 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$. Это позволяет определить величину КПД комплекса, которая может быть

достигнута:
$$\eta_{\text{компл}} = \frac{592 + 23}{1392} = \frac{615}{1392} = 0,442.$$

Таблица 3

Основные энергетические характеристики комплекса, сочетающего неадиабатическую ВАЭС, газотурбинную установку (ГТУ) и ветроэнергетическую установку (ВЭУ) для повышения его эффективности

Потребляет	Выдает
1. Привод компрессора (ВЭУ)	1*. Генерация электроэнергии в систему $W_{\text{ген}} = P_{\text{м}} \cdot t_{\text{разр}} = 290 \cdot 2 = 580 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$

2. Дополнительное потребление электроэнергии $W_{\text{доп}} = W_{\text{ген}} \cdot 0,8 = 580 \cdot 0,8 = 464 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	2*. Накопленная эксергия (потенциал) сжатого воздуха $\Pi_{\text{сж}} = (e_2 - e_1) \cdot V_B = (235 - 195) \cdot 300 = 12 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$
3. Дополнительное потребление природного газа $W_{\text{доп газ}} = 928 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	
Итого: 1392 МВт·ч	$\eta_{\text{компл}} = \frac{580 + 12}{1392} = \frac{592}{1392} = 0,425$

Выводы

Накопители энергии сжатого воздуха способны хранить значительное количество потенциальной энергии, которая может быть использована на воздушно-аккумулирующих электростанциях. В зависимости от того, отводится ли теплота сжимаемого агента или нет, ВАЭС подразделяют на два типа – адиабатическая и неадиабатическая. В статье рассматриваются оба типа ВАЭС. Воздух в компрессоре, накопителе и других элементах ВАЭС находится в режимах сжатия-расширения. Это значит, что необходимо уметь определять потенциал сжатого/расширенного воздуха, требуемый для составления эксергетического баланса соответствующих элементов схемы и ВАЭС в целом, без чего невозможно оценить эффективность их работы.

В статье предлагается метод определения энергетического потенциала сжатого воздуха, процедура составления эксергетического баланса и определения КПД соответствующих элементов схемы. На основе проведенного анализа процессов сжатия (расширения) воздуха в адиабатической ВАЭС сделан вывод о том, что такая схема, с позиций термодинамики, не может иметь высокий КПД. Однако этот тип ВАЭС имеет ряд экономических преимуществ: простота, низкие капиталовложения, обусловленные отсутствием компрессора, камеры сгорания для газовой турбины. Для повышения КПД процесса необходимо преобразовать тип ВАЭС в неадиабатический, что потребует изменения схемы и режима работы ее элементов. При этом сжатие в компрессоре должно производиться с максимально возможным отводом тепла, а процесс расширения в ГТУ открытого типа должен осуществляться с подводом тепла.

Оба типа с успехом могут работать совместно с ветроэнергетической установкой (ВЭУ), которая способна заменить электродвигатель компрессора, тем самым сократив потребление электроэнергии из сети.

Литература

1. Стычинский З.А. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / З.А. Стычинский, Н.И. Воропай. Магдебург–Иркутск: Отто-фон-Герике Университет Магдебург, 2010.
2. Литвак В.В. Основы регионального энергосбережения (научно-технические и производственные аспекты) / В.В. Литвак. Томск: Изд-во НТЛ, 2002.
3. Безруких П.П. Использование ветра. Техника. Экономика. Экология / П.П. Безруких . М.: Колосс, 2008.
4. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В.М. Бродянский. М.: Энергия, 1973.
5. Степанов В.С. Определение термомеханической эксергии газообразного топлива и потенциала энергосбережения в системах газоснабжения / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова // Промышленная энергетика. 2013. №11. С. 2–6.
6. Stepanov V.S. Analysis of energy efficiency of industrial processes / V.S. Stepanov. Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 186 p.
7. Эксергетические расчеты технических систем: справочное пособие / Под ред. А.А. Долинского, В. М. Бродянского. Киев: Наукова думка, 1991.
8. Степанов В.С. Эксергетический анализ систем генерирования, транспорта и потребления энергии / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова, Н.В. Старикова. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ.

9. Степанов В.С. Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ / В.С. Степанов, С.В. Степанов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006.

10. Степанов В.С. Потенциал и резервы энергосбережения в промышленности / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова. Новосибирск: Наука, 1990.

Авторы публикации

Степанов Владимир Сергеевич – д-р технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Степанова Татьяна Борисовна – д-р технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Старикова Наталья Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

References

1. Stychinskiy Z.A. Renewable energy sources: theoretical bases, technical characteristics, economy / Z.A. Stychinskiy, N.I. Voropay. Magdeburg–Irkutsk: Otto-von_Guericke-Universitat Magdeburg, 2010 (in Russian).

2. Litvak V.V. Principles of regional energy saving (science-technical and production aspects) / V.V. Litvak. Tomsk: NTL, 2002 (in Russian).

3. Bezrukih P.P. Using wind. Technologies. Economics. Ecology / Bezrukih P.P. M.: Coloss, 2008 (in Russian).

4. Brodyanskiy V.M. Exergy method of thermodynamic analysis / V.M. Brodyanskiy . M.: Energy, 1973. (in Russian).

5. Stepanov V.S. Calculating thermo-mechanical exergy of gaseous fuels and potentials of energy saving in gas supply systems /V.S. Stepanov, T.B. Stepanova // Industrial power engineering. 2013. №11. P. 2–6. (in Russian).

6. Stepanov V.S. Analysis of energy efficiency of industrial processes / V.S. Stepanov. Heidelberg: Springer-Verlag, 1992.

7. Exergy calculations of technical systems / Red. A.A. Dolinskiy, V.M. Brodianskiy. Kiev: Naukova dumka, 1991. (in Russian).

8. Stepanov V.S. Exergy analysis for systems of energy generation, transport and consumption / V.S. Stepanov, T.B. Stepanova, N.V. Starikova. Irkutsk: IIRNITU, 2016. (in Russian).

9. Stepanov V.S. Thermodynamics studies of metallurgical processes: energy balances, exergy analysis / V.S. Stepanov, S.V. Stepanov. Irkutsk: IrGTU, 2013. (in Russian).

10. Stepanov V.S. Potential and reserves of energy saving in industry / V.S. Stepanov, T.B. Stepanova. Novosibirsk: Nauka, 1990. (in Russian).

Authors of the publication

Vladimir S. Stepanov – Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia

Tatiana B. Stepanova – Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia

Natalia V. Starikova – Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia

Поступила в редакцию

16 октября 2018 г.



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЙЕМЕНА, ЕЁ СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Я.С.С. Али, Н.Д. Чичирова

Казанский государственный энергетический университет,

г. Казань, Россия

Yazid20@yandex.ru

***Резюме:** В статье проводится анализ энергетической системы республики Йемен, рассматриваются ее состав, характеристики линий электропередач, станций и подстанций, а также перспективы развития энергетической системы в республике.*

***Ключевые слова:** Йемен, энергетическая система, электростанции, ЛЭП, потребление электроэнергии.*

ELECTRIC POWER SYSTEM OF YEMEN, ITS STRUCTURE AND CHARACTERISTICS

Y.S.S. Ali, N.D. Chichirova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Yazid20@yandex.ru

***Abstract:** In this article analysis of the energy system of the Republic of Yemen, its composition and characteristics of the transmission lines, power stations and substations, it also considers the prospects for the development of the power system in the country.*

***Keywords:** Yemen, power system, power stations, high voltage line, electricity consumption.*

For citation: Ali Y.S.S., Chichirova N.D. Electric power system of Yemen, its structure and characteristics. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS.* 2019; 21(3-4):38-43. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-38-43.

Введение

Республика Йемен находится на Аравийском полуострове. Население страны составляет примерно 25 млн. человек, 70 % из них занимаются сельским хозяйством.

Основной промышленный потенциал страны исторически сосредоточен в прибрежной зоне. Естественному районированию страны отвечают сложившиеся зоны централизованного электроснабжения, которые представлены двумя регионами:

– северный и центральный, где проживает 17,5 млн. чел. (составляет 75 % населения страны);

– южный, население которого составляет 7,5 млн. чел.

В 1990 г. только 48 % населения страны пользовалось электроэнергией от централизованной сети. При этом потребление электроэнергии на душу населения составляло всего 300 кВт·ч в год. Для сравнения среднее значение в странах Юго-Западной

Азии составляло 1000 кВт·ч.

Около 3 млн. чел. проживает на возвышенных плато и в горных районах, где используются автономные источники электроэнергии и относительно небольшие по протяжённости участки распределительной сети. Восточная часть страны носит ровный характер и освоена в меньшей степени, чем западная.

В Йемене на одного работающего в электроэнергетике приходилось 200 занятых в других отраслях промышленности и в сфере обслуживания. В других странах Юго-Западной Азии указанный показатель в 3 раза меньше. В свою очередь отставание энергетики замедляет развитие всей республики.

22 мая 1990 г. произошло объединение двух республик в одну, что форсировало объединение и их энергосистем.

Сегодня единая энергосистема Йемена представляет собой развивающийся по государственному плану комплекс электростанций и сетей, объединённых общим режимом и единым централизованным оперативным управлением. Переход к этой форме организации электроэнергетического хозяйства создаёт предпосылки и возможности наиболее рационального использования энергетических ресурсов и повышения экономичности и надёжности электроснабжения страны.

По мере расширения масштабов энергосистемы Йемена задачи управления её режимами становятся всё более ответственными и сложными. Особое значение этих задач определяется ролью электроэнергетики в обеспечении нормальной деятельности всех отраслей сельского хозяйства, в улучшении функционирования социальных структур и условий жизни населения. Возрастающие трудности управления обусловлены большой протяжённостью электрических сетей ЭЭС, крайне неравномерным и находящимся во взаимном противоречии распределением энергоресурсов и производительных сил по территории страны, большой сложностью структуры генерирующих мощностей и схем системы образующих сетей. Все это требует применения современных экономико-математических методов и средств вычислительной техники при перспективном и оперативном управлении. В области теории и практики управления режимами йеменскими энергетиками проведена значительная работа. Достижения в этой области являются результатом целенаправленной совместной деятельности научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организаций. Результаты проведённых исследований и полученный опыт эксплуатации не только позволяют успешно решать текущие задачи управления, но и создают основу для решения более сложных задач, связанных с завершением формирования ЭЭС Йемена. Так за последние 5 лет коэффициент электрификации потребителей вырос до 70 %, а строительство новых ВЛ позволило обеспечить рост пропускной способности сети на 40 % и увеличить зону централизованного электроснабжения. Тем не менее, из-за отсутствия инвестиций в электроэнергетику ее работа характеризуется рядом неблагоприятных показателей, таких как напряженные балансы активной мощности из-за недостатка генерирующих мощностей, что вызывает необходимость в ограничениях потребителей; использование сравнительно низких номинальных напряжений для передачи электроэнергии на значительные расстояния (свыше 100–150 км при напряжении 132 кВ); низкие уровни напряжения в крупных узлах нагрузки, вследствие значительных дефицитов реактивной мощности; неравномерность развития северной и южной частей энергосистемы; наличие слабых связей между северной и южной частями энергосистемы; недостаточная надежность главных распределительных устройств электростанций и подстанций; использование энергетического оборудования различных производителей и т.д. Все это определяет необходимость обеспечения более надежной работы энергосистемы и ее элементов за счет более современных и комплексных технических решений по схемам распределительных устройств станций, по схеме энергосистемы, управления ее нормальными и аварийными режимами и противоаварийной автоматике.

Электрические станции и их характеристики

Основу существующей объединенной системы составляют 3 крупные тепловые электрические станции (ТЭС) и одна газотурбинная установка (ГТУ), расположенные в городах Al-Nodeidah (две станции), Aden (одна станция) и Marib (ГТУ). Остальные станции работают на дизельном топливе.

До объединения республики энергосистема (ЭС) южного Йемена имела только одну крупную ТЭС 5x25 МВт советского производства. Остальные станции – дизельные, небольшой мощности. В северной энергосистеме Йемена существовали две ТЭС итальянского производства 5x33 и 4x40 МВт.

Остальные генерирующие мощности составляли дизельные станции. Пики нагрузки в разных частях Йемена не совпадали по времени в течение года, и приходилось иметь значительный вращающийся резерв в обеих частях ЭС.

22 мая 1990 г. произошло объединение двух республик в одну – Йеменскую республику, что форсировало объединение и их энергосистем. Объединение Йемена сопровождалось ростом производства. Открывались новые фабрики, строились новые гостиницы и т.д. Это вызвало потребность в строительстве новых станций. Объединение Йемена вызвало также строительство новых линий электропередач (ЛЭП), которые соединили две энергосистемы для обеспечения перетока мощности между ними. Однако это не решило проблему электроснабжения столицы республики – Sana. И были построены две дизельные станции суммарной мощностью 130 МВт.

Характеристики генерирующих источников республики Йемен приведены в таблице.

Таблица
Общая характеристика электростанций Йемена

Название станции	Тип	Вид топлива	Мощность генераторов, МВт	Количество генераторов	Установленная мощность станции, МВт
Hiswa	ТЭС	мазут	25	5	125
Ras-Katheeb	ТЭС	мазут	33	5	165
Al-Makha	ТЭС	мазут	40	4	160
Al-Manswra	Дизельная	Диз. топливо	8	8	64
Sana	Дизельная	Диз. топливо	40	2	80
Ког-Максар	Дизельная	Диз. топливо	2/4	4/6	32
Marib (Safir)	ГТУ	Газ	115	3	345

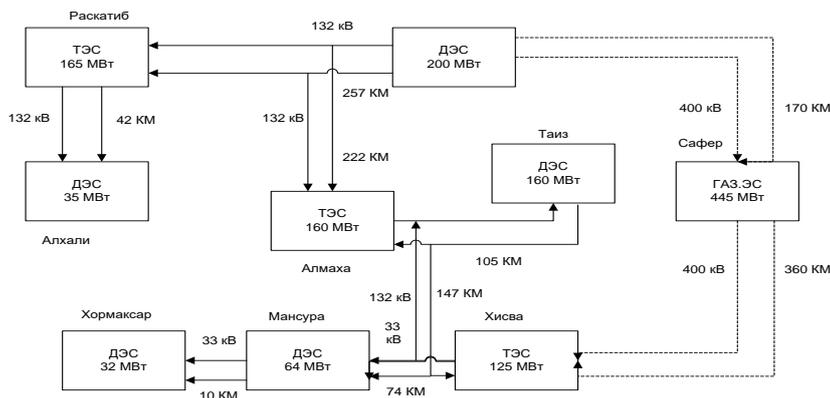


Рис. 1. Схема связей между электростанциями Йемена

На рис. 1 показана двухцепная воздушная линия (ВЛ) 400 кВ (Safir – Sana и Safir – Hiswa) протяженностью 170 км. Для обеспечения работоспособности линия электропередач

оснащена последовательными и поперечными регулируемыми устройствами, которые обеспечивают поддержание напряжения на уровне 400 кВ ($\pm 5\%$). На подстанциях установлены автотрансформаторы 400/132 кВ и трансформаторы 132/33 кВ. Для резервирования собственных нужд на подстанциях предусмотрены дизель-генераторы.

Потребители электроэнергии и их характеристики

В 1992 г. в Йемене была начата реализация глобальной программы по электрификации сельскохозяйственных районов страны. Проект, разработанный национальной энергетической компанией (*Office National de L'Electric ale, Casablanca*), предусматривает до 2025 г. электрификацию 40 тыс. населенных пунктов по всей территории страны. В программе предусмотрено электроснабжение многих населённых пунктов, не имеющих собственных источников, и развитие существующей системы электроснабжения.

Возможные сценарии прогнозируемого роста электропотребления в энергетической системе Йемена (ЭСЙ) до 2025 года показаны на рис. 2.

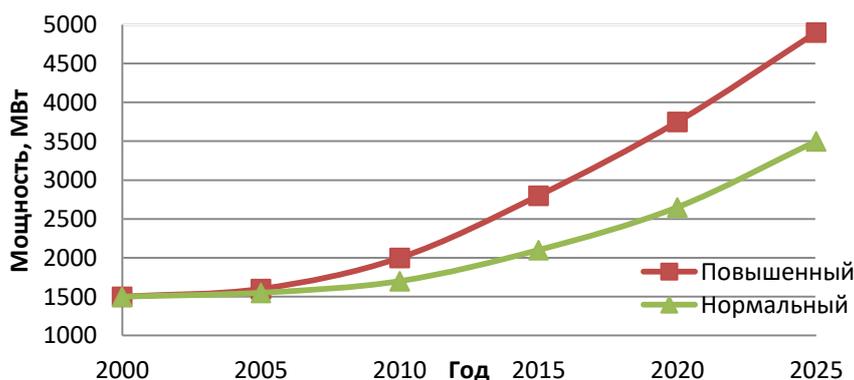


Рис. 2. Графики прогнозируемого роста электропотребления в ЭСЙ

Из представленного графика видно, что электропотребление в ЭСЙ к 2025 году увеличится в 2–3 раза.

Это обеспечит рост потребления электроэнергии населением, даст возможность решить ряд социальных проблем и электрифицировать сельскохозяйственное производство.

Перспективы развития электроэнергетики Йемена

Характеризуя развитие электроэнергетики в Йемене, можно отметить, что в 1990 г. только 48 % населения страны пользовалось электроэнергией от централизованной сети. Работа энергосистемы характеризовалась рядом неблагоприятных показателей. Получаемые за оплату электроэнергии средства не обеспечивают проведение ремонта и выполнение восстановительных работ, а инвестиции в развитие электроэнергетики незначительны.

Наряду с широкой программой приватизации электроэнергетики государство сохранило за собой право главного регулирующего органа.

Основные направления реформирования электроэнергетики страны сводились к следующему.

1. Все вопросы эксплуатации и развития генерирующего комплекса сосредоточены в отдельных государственных компаниях.
2. Планирование роста спроса на электроэнергию находится в ведении образованного Комитета по экономике. Ему же передаются данные о генерирующих энергокомпаниях (ЭК). Он же обеспечивает их исходными материалами для планирования и последующего развития генерирующего комплекса.
3. Мониторинг ценовых показателей и подготовка материалов для формирования финансовой политики.
4. Организация соответствующего подразделения, ответственного за обеспечение качества

электроэнергии в энергосистеме и у потребителей (уровни напряжения, отклонения частоты, наличие гармоник и т.д.).

Все организационные и технические преобразования в электроэнергетике, проведённые в последние годы в Йемене, дали свои положительные результаты. Так, за последние 5 лет коэффициент электрификации потребителей вырос до 70 %, а проведённое строительство новых ВЛ позволило обеспечить рост пропускной способности сети на 40 % и увеличить зону централизованного электроснабжения. Вместе с тем данные по развитию электроэнергетики Южного района свидетельствуют о его существенном отставании от Северной и Центральной частей страны. Чтобы удовлетворить растущие потребности и прежде всего нужды горнорудной промышленности в Южном районе, требуется наращивание генерирующих мощностей, строительство ВЛ и ПС.

Выводы

1. Основу существующей объединенной энергосистемы составляют 4 крупных электростанции, расположенные в городах *Al-Hodeidah* (две станции), *Marib* и в *Aden*. Значительную долю установленной мощности энергосистемы составляют автономно работающие дизельные станции мощностью от 2 до 8 МВт.
2. Объединение двух республик в одну Йеменскую республику повлекло за собой потребность в строительстве новых ЛЭП, которые соединили две энергосистемы для обеспечения перетока мощности между ЭС.
3. Специфической особенностью ЭС Йемена является преобладание в северной части Йемена нагрузки в виде обогревателей, используемых в основном в зимнее время, так как она находится в горном районе. В южной части Йемена основную часть нагрузки составляют кондиционеры и вентиляторы, используемые в основном летом. Так как максимумы нагрузки на севере и юге не совпадают по времени, то перетоки мощности в системе составляют значительную величину
4. Особенностью работы электрооборудования и, в первую очередь трансформаторов, является высокая температура окружающей среды, которая в южных районах республики может превышать 40 °С.
5. В случае отключения линий связи в энергосистеме есть высокий риск образования значительных дефицитов мощности. Наличие в энергосистеме значительной доли автономно работающих дизельных станций, а также перспективы их включения на параллельную работу с энергосистемой Йемена требует исследования их систем регулирования по частоте и мощности. Для проведения таких исследований необходима разработка соответствующего программного обеспечения, а также применение современных методов анализа переходных процессов в разных режимах при разных системах регулирования и их задачах.

Литература

1. Zahure H., Aeish D. Calculation of the set modes of electrical systems the Republic Yemen taking into account frequency change / Journal Future University // Taiz University, 2013. № 2. pp. 173-181.
2. Alshaghdari I. T., Ahmed W. C.. Increase in overall performance of power supply systems // Journal of the university researcher / Ibb university, 2016. № 5. pp 151-159.
3. Al- Hetar E. L., Al- Udyni S. D. Development of actions for reliability augmentation of the main schemes of power plants of the republic Yemen // Journal of Science and Technology / University of Science and Technology, Sana'a, 2015. № 1. pp. 472-477.
4. Energy-policy Framework Conditions for Electricity Markets and Renewable Energies // 23 Country Analyses / Chapter Yemen/ Eschborn, September 2016. pp.486-497.
5. Al Wasube K.F., Abdulkadir W.B. A status and features of power industry of Yemen // Journal Future University // Taiz University, 2016. № 3. pp.134-142.
6. Al-Ashwal Y.A., Al-Mawgani L.R.C. Research of operation modes of an electrical power system of the

republic Yemen // Journal of Science and Technology / University of Science and Technology, Sana'a, 2017. № 12(42). pp. 292-299.

7. Althothaily S.R., Alradaey Q.T. Automatic frequency unloading in separately to the working power supply system // Increase in overall performance of power supply systems, Journal Future University; Аден, 2014. № 10. pp. 681-690.

8. Al Nozayly P.S., Al Sabaehi M.Y. Relay protection and automatic equipment in power supply system of Yemen // Journal of the university researcher / Ibb university, 2018. № 2. pp. 221-230.

9. [Электронный ресурс]. Доступно по: www.asia-energy.com. Ссылка активна на 15 августа 2017.

10. Al-Ansi N.R., Wahid H., Wan S.H., et al. Status and perspectives of development of electrotechnologies in the republic Yemen // Journal of the university researcher / Damar university, 2015. № 4. pp. 451-459.

Авторы публикации

Али Язид Салех Салем – аспирант Казанского государственного энергетического университета.

Чичирова Наталия Дмитриевна – док хим наук, профессор, кафедры Тепловые электрические станции Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Zahure H, Aeish D. Calculation of the set modes of electrical systems the Republic Yemen taking into account frequency change. Journal Future University. Taiz University; 2013. (in Yemen).

2. Alshaghdari IT, Ahmed WC. Increase in overall performance of power supply systems. Journal of the university researcher. Ibb university; 2016. (in Yemen).

3. Al-Hetar EL, Al-Udini SD. Development of actions for reliability augmentation of the main schemes of power plants of the republic Yemen. Journal of Science and Technology. University of Science and Technology, Sana'a; 2015. (in Yemen).

4. Energy-policy Framework Conditions for Electricity Markets and Renewable Energies. 23 Country Analyses. Chapter Yemen; September 2016; Eschborn, Germany; 2016.

5. Al Wasube KF, Abdulkadir WB. A status and features of power industry of Yemen. Journal Future University. Taiz University; 2016. (in Yemen).

6. Al-Ashwal YA, Al-Mawgani LRC. Research of operation modes of an electrical power system of the republic Yemen. Journal of Science and Technology. University of Science and Technology, Sana'a; 2017: 12(42):292-299. (in Yemen).

7. Althothaily S.R., Alradaey Q.T. Automatic frequency unloading in separately to the working power supply system. Increase in overall performance of power supply systems, Journal Future University, Аден, 2014. (in Yemen).

8. Al Nozayly PS, Al Sabaehi MY. Relay protection and automatic equipment in power supply system of Yemen. Journal of the university researcher. Ibb university; 2018. pp. 221-230. (in Yemen).

9. [Website]. Available at: www.asia-energy.com. Accessed: 15 Aug 2017.

10. Al-Ansi NR., Wahid H., Wan S.H., et al. Status and perspectives of development of electrotechnologies in the republic Yemen. Journal of the university researcher. Damar university; 2015. pp. 451-459. (in Yemen).

Authors of the publication

Yazid S.S. Ali – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Natalia D. Chichirova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Поступила в редакцию

24 декабря 2018 г.



РАБОТА ВОДЯНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА НА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБКИ ИСПАРИТЕЛЯ

В.И. Максимов, А. Салум

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия
amer-salom@hotmail.com

Резюме: Экспериментально исследованы закономерности и характеристики образования льда на поверхности трубки испарителя теплового насоса при использовании холодной (при температуре менее 280 К) воды в качестве низкопотенциального источника энергии. В условиях работы такого теплового насоса зарегистрированы значения температуры воды в испарителе, температуры поверхности трубки испарителя, толщины слоя льда. Полученные результаты позволили сделать вывод о возможности использования водяного теплового насоса на практике в условиях частичного формирования слоя льда на поверхности трубки испарителя, при прогреве воды в конденсаторе до 313 К. Экспериментально установлено, что, при снижении начальной температуры воды в испарителе на 6 градусов, максимальное значение толщины льда, формирующегося на поверхности трубки испарителя, увеличивается на 30 %. Лед, образующийся на испарителе, после достижения максимального значения температуры воды в конденсаторе, полностью тает с течением времени. Установлена зависимость числа Нуссельта от характеристик естественно-конвекционного теплообмена при фазовом переходе.

Ключевые слова: водяной тепловой насос, температура, лёд, испаритель, теплоперенос при фазовых превращениях, конвекция.

THE WATER HEAT PUMP OPERATION UNDER FROST CONDITIONS ON THE EVAPORATOR SURFACE

V.I. Maksimov, A. Saloum

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
amer-salom@hotmail.com

Abstract: The conditions and characteristics of ice formation on the pipe surface of a heat pump evaporator which depends on water (at a temperature lower than 280 K) as a low-grade energy source are investigated experimentally. Under the operating conditions of this heat pump, the ice thicknesses and temperatures values at freon pipe wall and for water in the evaporator are registered. The results allowed us to make a conclusion of the possibility to use a water source heat pump in practical applications under the conditions of partial ice coverage for the evaporator surface to heat up water in a condenser to 313 K. It is established from experiments that with the decrease in water initial temperature in the evaporator by 6 degrees, the maximum value of formed ice thickness on the evaporator surface is increased by 30 %. The dependence of Nusselt number on the natural convection characteristics undergoing phase change is established.

Keywords: water heat pump, temperature, ice, evaporator, heat transfer during phase change, convection.

For citation: Maksimov V.I., Saloum A. The water heat pump operation under frost conditions on the evaporator surface. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):44-51. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-44-51.

Введение

Тепловые насосы с низкопотенциальным водяным источником энергии обеспечивают локальное нагревание среды с высоким уровнем коэффициента преобразования (2–4) [1]. Водяной контур, по своей сути, генерирует значительную часть теплоты, необходимой для обогрева здания. Системы на основе тепловых насосов с водяным контуром функционируют достаточно эффективно, даже в условиях частичной нагрузки [2].

Температура воды в водоемах большой глубины в холодное время года выше температуры окружающего воздуха [3]. Например, средняя температура воды в озере изменяется в пределах 275–286 К при температуре окружающего воздуха 263–277 К [4]. Поэтому тепловой потенциал источников энергии для водяных тепловых насосов выше теплового потенциала энергии для воздушных тепловых насосов.

В настоящее время применение тепловых насосов, использующих теплоту грунта, в мире резко возросло [5], но их монтаж и техническое обслуживание в процессе эксплуатации представляют достаточно существенные сложности [6]. Кроме того, такие насосы оказывают отрицательное влияние на температуру почвы после длительного периода эксплуатации [7]. Еще одним из существенных недостатков данного типа тепловых насосов является относительно низкое значение теплопроводности почвы [8]. Все эти недостатки можно избежать при использовании воды в качестве источника энергии. Но в таком случае при низких температурах воды возможно формирование льда на поверхности трубки испарителя, что существенно снижает эффективность теплового насоса в целом [9].

Достаточно подробно процесс теплообмена между поверхностью спиральной трубки фреонового контура испарителя теплового насоса и водой низкопотенциального источника изучен такими авторами, как Зу С., Ни Л., Яу У. [10, 11]. Но схема проведения эксперимента [11] предполагала, что температура поверхности трубки испарителя выше 273 К. Соответственно, лед не образуется, а влиянием вертикального и горизонтального шага трубки испарителя на интенсивность теплообмена можно пренебречь.

Установлено, что образование льда на трубке испарителя приводит к неравномерному распределению температуры по объему жидкости в камере испарителя и существенно снижает интенсивность теплообмена [12]. Результаты работы [12] позволяют выбрать режим работы теплового насоса при полном или частичном формировании слоя льда на трубке испарителя. Так, например, слой льда толщиной 0,003 м снижает тепловой поток от воды к фреону до 40 % [13]. Поддержание же температуры воды на уровне 277 К приведет к возникновению естественной конвекции и увеличению скорости роста льда на 10–50 % (в зависимости от высоты испарителя).

Целью данной работы является исследование характеристик работы теплового насоса в условиях формирования льда на трубке испарителя при использовании холодной воды в качестве низкопотенциального источника энергии, а также обоснование возможности реализации режимов функционирования теплового насоса с циклами образования льда и его плавления.

Методика исследования

Серия экспериментов выполнена с водяным тепловым насосом (ТН) (рис. 1) по методике [14]. Температура воды по высоте испарителя в окрестности трубки фреонового

контура измерялась с использованием 15-ти термопар, расположенных на расстоянии 0,0154 м друг от друга. Также на поверхности медной трубки фреонового контура теплового насоса было установлено 15 термопар на расстоянии 0,23 м друг от друга по направлению движения теплоносителя.

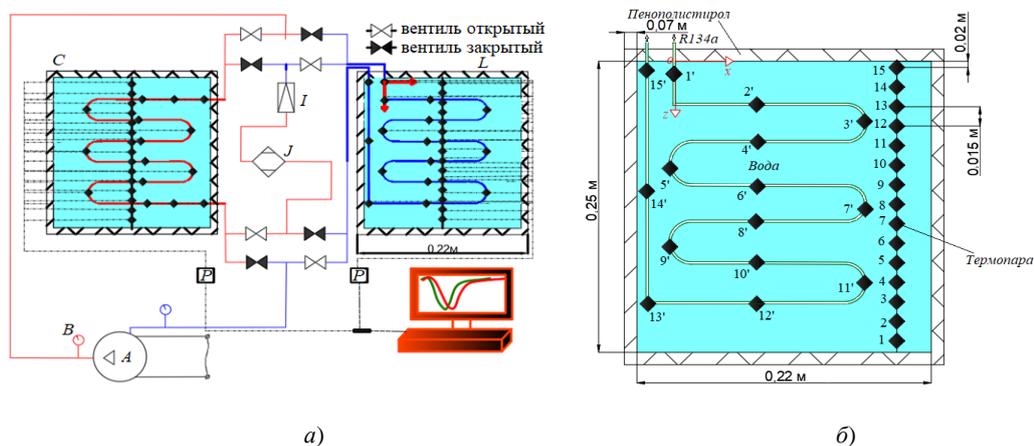


Рис. 1. Принципиальные схемы экспериментальной установки (а) и точки установки термопар (б): а) А – компрессор; В – манометр; С – камера конденсатора; J – фильтр; I – дроссель; L – камера испарителя; P – аналого-цифровой преобразователь; б) ромбами обозначены точки контроля температуры

Термопары типа ХА, с размером рабочего спая около 0,001 м, подключались к 16-ти разрядному аналого-цифровому преобразователю и через сетевой адаптер – к персональному компьютеру. Прикладное программное обеспечение, разработанное в пакете *National Instruments LabVIEW*, использовалось для регистрации значений температур в режиме реального времени и обработки экспериментальных данных. Толщина слоя льда, формирующегося на поверхности трубки испарителя, фиксировалась цифровым штангенциркулем.

Температура воды вблизи поверхности водоемов, используемых для работы тепловых насосов в холодное время года, выше температуры воздуха [15]. Установлено, что средняя температура воды в озере изменяется в диапазоне 275–286 К при температуре воздуха 263–277 К [16] соответственно, поэтому начальное значение температуры воды (T_0''), омывающей испаритель ТН, составляло в первом опыте 280 К, а во втором – 286 К. Вода в конденсаторе нагревалась с температуры окружающей среды 291 К. Давление фреона в испарителе (0,2 МПа) и его расход (0,002 кг/с) были постоянными. При идентичных условиях каждый опыт повторялся три раза, с целью повышения точности измерений. Суммарная относительная систематическая погрешность всех элементов системы регистрации определения значений температур не превышала 4,6 % во всем диапазоне изменения параметров. Случайная погрешность составляла менее 5 %.

Результаты и обсуждение

Установлено, что после начала работы экспериментального стенда (водяного теплового насоса) происходило резкое падение температуры стенки трубки фреонового контура (T_1) на входе в испаритель (термопара 1') до значения 258 К (рис. 2). Но с течением времени ($\tau \sim 1000$ с) T_1 начинало расти вследствие повышения температуры воды, омывающей конденсатор. Также после запуска теплового насоса термопарами 2'–5' зарегистрировано снижение температуры стенки трубки фреонового контура в окрестности ввода в испаритель. Её увеличение вдоль трубки испарителя объясняется испарением фреона и перегревом его паров. По истечении 10000 с после начала эксперимента

температура поверхности трубки на входе в испаритель превышала 273 К, что приводило к плавлению льда, образовавшегося на поверхности трубки испарителя.

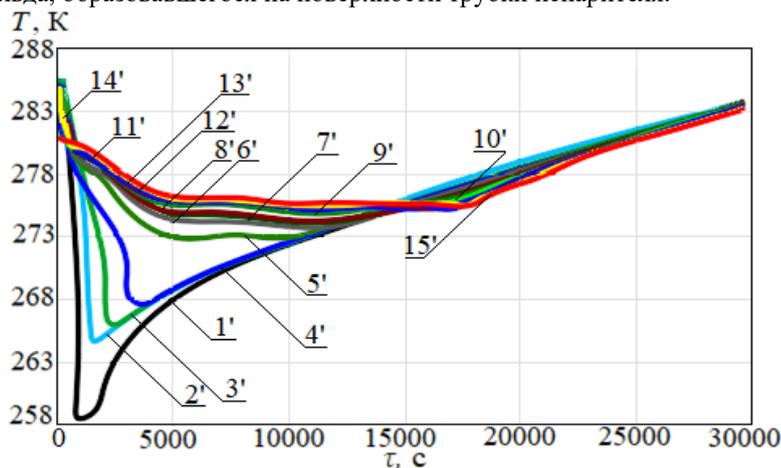


Рис. 2. Изменение во времени температуры наружной поверхности трубки испарителя ($T_0^{II} = 280$ К):

1', 15' – термопары на поверхности трубки на входе и выходе камеры испарителя;
2'–14' – термопары на поверхности трубки испарителя на расстоянии 0,230 м друг от друга

Также при проведении экспериментальных исследований зарегистрировано изменение температуры воды в испарителе на разной высоте (рис. 3).

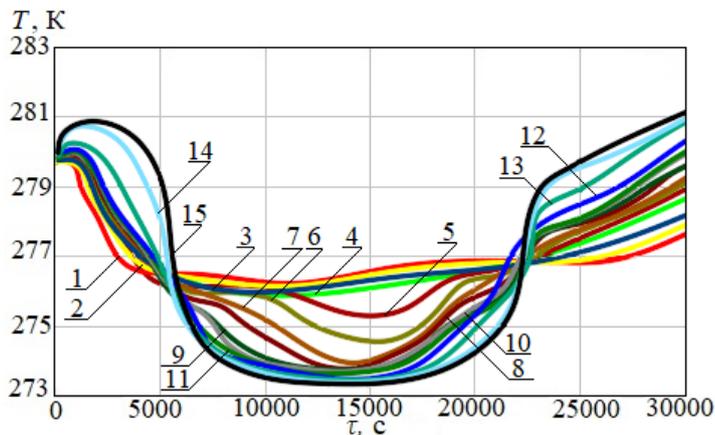


Рис. 3. Изменение во времени температуры воды в испарителе на разных высотах ($T_0^{II} = 280$ К):

1 – термопара в нижней части испарителя; 15 – термопара в верхней части испарителя; 2–14 – термопары, расположенные на разной высоте в испарителе на расстоянии 0,0154 м друг от друга

Повышение температуры воды в течение первых 600 с происходит вследствие отвода теплоты от фреона, температура которого идентична температуре окружающей среды. По истечении 600 с температура фреона резко возрастала. Вследствие эндотермического теплового эффекта фазового превращения вода в окрестности трубки испарителя остывала. Показания термопары 1, расположенной в нижней части испарителя, иллюстрируют самую низкую температуру в первые 6000 с работы теплонасосной установки (рис. 3). Показания термопар 2–15, расположенных выше термопары 1, иллюстрируют более высокие температуры (рис. 3). В интервале времени от 6000 до 10000 с, температура воды в нижней области испарителя составляла около 277 К, а в верхней – 274–276 К. Это объясняется более высокой плотностью воды при температуре 277 К по сравнению с меньшими значениями температуры. При τ больше 11000 с температура воды в испарителе возрастает

из-за увеличения температуры фреона в трубке, т.к. относительно теплая вода в конденсаторе не охлаждает фреон до температуры конденсации.

Изменение температуры воды в конденсаторе на разной высоте показано на рис. 4. Температура воды возрастает от 291 до 308 К ко времени 6000 с после начала работы теплового насоса. Вода, прогретая до таких значений температуры, может быть использована в локальных системах отопления помещений. Но такой обогрев будет эффективен только при температуре воздуха не ниже 283–290 К. Если по истечении 6000 с эта вода не используется в системе отопления, то ее температура продолжает расти и достигает значения 313 К в верхней части конденсатора. В таких условиях фреон не охлаждается до температур, необходимых для завершения процесса конденсации. При 11000–12000 с температура фреона на выходе конденсатора выше 273 К. Это приводит к таянию льда в испарителе (рис. 5, 6).

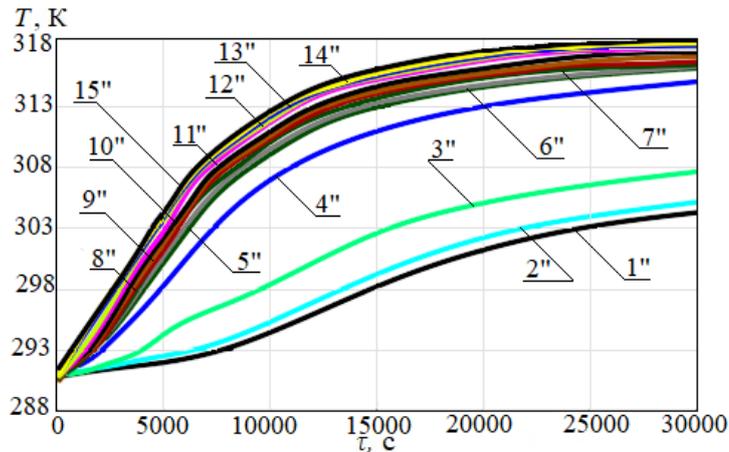


Рис. 4. Изменение во времени температуры воды в конденсаторе на разной высоте ($T_0'' = 280$ К): 1" – термомпара в нижней части конденсатора; 15" – термомпара в верхней части конденсатора; 2"–14" – термомпары, расположенные на разной высоте в конденсаторе на расстоянии 0,0154 м друг от друга

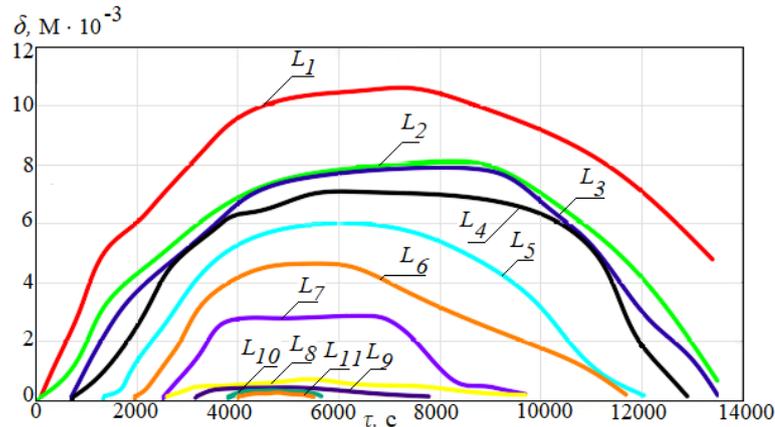


Рис. 5. Изменение во времени толщины льда в разных точках на трубке фреонового контура в испарителе (координаты точек измерений температуры приведены в таблице, $T_0'' = 280$ К)

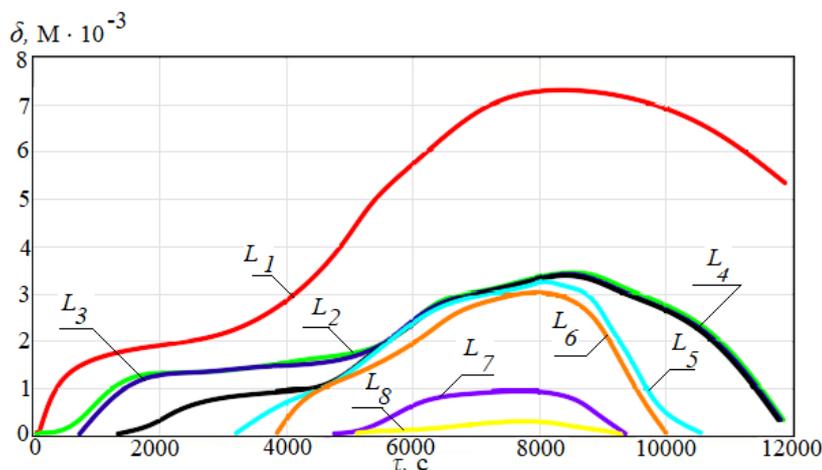


Рис. 6. Изменение во времени толщины льда в разных точках поверхности трубы фреонового контура в испарителе при начальной температуре $T_0'' = 286$ К: координаты точек измерений температуры приведены в таблице

Таблица

Координаты контрольных точек при измерении толщины слоя льда на поверхности трубы испарителя

Контрольная точка	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}	L_{11}	
Расстояние от входа трубы в испаритель, м	0	0,11	0,26	0,44	0,59	0,77	0,92	1,11	1,25	1,43	1,58	
Декартовы координаты, м	x	0	0,11	0,11	-	-	0,11	0,11	-	-	0,1	0,11
	y	0	0	0,14	0,14	0	0	0,14	0,14	0	0	0,14
	z	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,09	0,09	0,09	0,09	0,1	0,13

Лёд, образовавшийся в течение первых 8000 с работы ТН, полностью тает в течение 5000 с. После этого тепловой насос нагревает воду с 291 до 313 К.

На основании результатов экспериментов можно сделать вывод, что при начальной температуре воды 286 К, омывающей испаритель, толщина льда в разных точках поверхности трубы фреонового контура в испарителе меньше на 0,024 м по сравнению со средней толщиной льда при начальной температуре воды 280 К, и общее время плавления льда составляет около 4000 с.

На основании результатов выполненных экспериментов можно сделать вывод, что лёд, образующийся при работе ТНУ на поверхности трубы испарителя, в реальных условиях холодного периода времени года (осень, зима, весна) существенно снижает эффективность работы теплонасосной установки в течение периода времени до двух часов работы. После образования слоя льда происходит дополнительный разогрев контура, и лёд тает в течение 2–3 часов. После полного таяния льда цикл повторяется. В результате эффективность ТНУ существенно снижается, потому что максимальные температуры, достигаемые на выходе конденсатора, не превышают 313 К.

Анализ полученных значений температуры воды в конденсаторе и испарителе экспериментальной установки теплового насоса позволяет сделать вывод, что рассмотренный способ нагрева воды в конденсаторе до температуры 313 К может быть использован в системах отопления типа «теплый пол» [17, 18]. Однако в таких условиях температура во фреоновом контуре испарителя снижается до 273 К, что ведет к

образованию льда на поверхности трубки. При прогреве воды в конденсаторе до максимального значения фреон конденсируется частично и, как результат, температура стенки трубки испарителя становится выше температуры замерзания воды. В таких условиях образовавшийся лед плавится. Время плавления льда увеличивается на 4 % при уменьшении начальной температуры воды в конденсаторе на каждый градус. После плавления льда тепловой насос можно снова использовать для нагрева воды с 291 до 313 К.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке конструкции испарителя, функционирующего в условиях формирования слоя льда на трубке фреонового контура. Толщина слоя льда на входе трубки в испаритель увеличивается на 4 % при уменьшении температуры воды в испарителе на каждый градус. Для нагрева воды с 291 К до более высокой температуры 313 К можно использовать установку, состоящую из 2-х тепловых насосов. Один из них будет работать в режиме нагрева, а другой – в режиме плавления льда для поддержания температуры воды 313 К в резервуаре локальной системы отопления.

Заключение

Результаты выполненного исследования подтверждают возможность работы водяной тепловой насосной станции в условиях формирования льда на поверхности испарительной трубки при температуре воды в испарителе, соответствующей температуре воды в поверхностных водоемах, расположенных в разных регионах России, в холодный период года: «осень – зима – весна» для обоснования условий работы систем типа «теплый пол».

Литература

1. Experimental study of a new multifunctional water source heat pump system / X. Liu, F. Li, Q. Guo, Y. Zhang, T. Sun // *Energy Build.* 2016. Vol. 111. P. 408–423. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.11.069.
2. Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating / M. A. Sayegh, P. Jadwiszczak, B.P. Axcell, E. Niemierka, K. Bryś, H. Jouhara // *Energy Build.* 2018. Vol. 166. P. 122–144. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.02.006.
3. Liu Z., Tan H., Li Z. Heating and Cooling Performances of River-Water Source Heat Pump System for Energy Station in Shanghai // *Procedia Eng.* 2017. Vol. 205. P. 4074–4081. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.898.
4. Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B. A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes // *Hydrol. and Earth System Sciences.* 2013. Vol. 8. P. 3323–3338. DOI: 10.5194/hess-17-3323-2013.
5. Livingstone D.M., Lotter A.F. The relationship between air and water temperatures in lakes of the Swiss Plateau: a case study with palaeolimnological implication // *J. Paleolimnol.* 1998. Vol. 9. P. 181–198.
6. Wu W., Skye H. M. Progress in ground-source heat pumps using natural refrigerants // *Int. J. of Refrig.* 2018. Vol. 92. P. 70–85. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.05.028.
7. Valizade L. Ground Source Heat Pumps // *J. Clean Energy Technol.* 2013. Vol. 3. P. 216–219.
8. Todoran T.P., Balan M.C. Long term behavior of a geothermal heat pump with oversized horizontal collector // *Energy Build.* 2016. Vol. 133. P. 799–809. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.10.037.
9. Zhang N., Wang Z. Review of soil thermal conductivity and predictive models // *Int. J. Therm. Sci. Elsevier Masson SAS.* 2017. No. 117. P. 172–183. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013.
10. Харченко В. В., Сычёв А.О. Использование низкопотенциальной теплоты поверхностного водотока в теплонасосной системе теплоснабжения сельского дома // *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК.* 2014. № 194-2. С. 19–24.
11. Харченко В.В., Сычёв А.О. Оптимизация низкотемпературного контура теплонасосной установки на основе теплоты поверхностных вод // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология.* 2013. № 7 (129). С. 31–36.
12. Zhou C., Ni L., Yao Y. Heat transfer analysis of multi-row helically coiled tube heat exchangers for surface water-source heat pump // *Energy.* 2018. Vol. 163. P. 1032–1049. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.190.

13. Maksimov V.I., Nagornova T.A., Chernyshev V.S. Conditions and characteristics of water crystallization on the working surface of evaporator heat pumps in reservoirs with low temperatures // MATEC Web of Conferences: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment. Tomsk, 2015. Vol. 23, № 01051 (1-8). DOI: 10.1051/mateconf/20152301051.

14. Maksimov V.I., Saloum A. An experimental study of the effect of water bodies temperature on water heat pump performance // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 194, № 01050 (1-4). DOI: 10.1051/mateconf/201819401050.

15. Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B. A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes // Hydrology and earth system sciences. 2013. Vol. 8. P. 3323 – 3338. DOI:10.5194/hess-17-3323-2013.

16. Livingstone D.M., Lotter A.F. The relationship between air and water temperatures in lakes of the Swiss Plateau: a case study with palaeolimnological implication // Journal Paleolimnol. 1998. Vol. 9. P. 181–198. URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1007904817619>.

17. Sebarchievici C., Dan D., Sarbu I. Performance assessment of a ground-coupled heat pump for an office room heating using radiator or radiant floor heating systems // Procedia Engineering. 2015. Vol. 118. P. 88–100. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.407.

18. Performance evaluation of different heating terminals used in air source heat pump system / H. Bin, R.Z.Wang, B. Xiao, L. He, W. Zhang, Sh. Zhang // International Journal of Refrigeration. 2019. Vol. 98. P. 274–282. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.10.014.

Авторы публикации

Максимов Вячеслав Иванович – канд. техн. наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Салум Амер – аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

References

1. Experimental study of a new multifunctional water source heat pump system / X. Liu, F. Li, Q. Guo, Y. Zhang, T. Sun // Energy Build. 2016. Vol. 111. P. 408–423. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.11.069.

2. Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating / M. A. Sayegh, P. Jadwiszczak, B.P. Axcell, E. Niemierka, K. Bryś, H. Jouhara // Energy Build. 2018. Vol. 166. P. 122–144. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.02.006.

3. Liu Z., Tan H., Li Z. Heating and Cooling Performances of River-Water Source Heat Pump System for Energy Station in Shanghai // Procedia Eng. 2017. Vol. 205. P. 4074–4081. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.898.

4. Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B. A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes // Hydrol. and Earth System Sciences. 2013. Vol. 8. P. 3323–3338. DOI: 10.5194/hess-17-3323-2013.

5. Livingstone D.M., Lotter A.F. The relationship between air and water temperatures in lakes of the Swiss Plateau: a case study with palaeolimnological implication // J. Paleolimnol. 1998. Vol. 9. P. 181–198.

6. Wu W., Skye H.M. Progress in ground-source heat pumps using natural refrigerants // Int. J. of Refrig. 2018. Vol. 92. P. 70–85. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.05.028.

7. Valizade L. Ground Source Heat Pumps // J. Clean Energy Technol. 2013. Vol. 3. P. 216–219.

8. Todoran T.P., Balan M.C. Long term behavior of a geothermal heat pump with oversized horizontal collector // Energy Build. 2016. Vol. 133. P. 799–809. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.10.037.

9. Zhang N., Wang Z. Review of soil thermal conductivity and predictive models // Int. J. Therm. Sci. Elsevier Masson SAS. 2017. No. 117. P. 172–183. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013.

10. Kharchenko V.V., Sychev A.O. Use of low potential heat of surface water in heat pump heat supply systems farmhouse // Scientific Herald of NULES of Ukraine. Series: Technique and energy of APK. 2014. № 194-2. P. 19–24 (in Russian).

11. Kharchenko V.V., Sychev A.O. Optimization of low temperature circuit of surface water heat pump based system // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2013. № 7 (129). P. 31-36 (in Russian).

12. Zhou C., Ni L., Yao Y. Heat transfer analysis of multi-row helically coiled tube heat exchangers for surface water-source heat pump // Energy. 2018. Vol. 163. P. 1032–1049. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.190.

13. Maksimov V.I., Nagornova T.A., Chernyshev V.S. Conditions and characteristics of water crystallization on the working surface of evaporator heat pumps in reservoirs with low temperatures // MATEC Web of Conferences: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment. Tomsk, 2015. Vol. 23, № 01051 (1-8). DOI: 10.1051/mateconf/20152301051.

14. Maksimov V.I., Saloum A. An experimental study of the effect of water bodies temperature on water heat pump performance // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 194, № 01050 (1-4). DOI: 10.1051/mateconf/201819401050.

15. Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B. A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes // Hydrology and earth system sciences. 2013. Vol. 8. P. 3323–3338. DOI:10.5194/hess-17-3323-2013.

16. Livingstone D.M., Lotter A.F. The relationship between air and water temperatures in lakes of the Swiss Plateau: a case study with palaeolimnological implication // Journal Paleolimnol. 1998. Vol. 9. P. 181–198. URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1007904817619>.

17. Sebarchievici C., Dan D., Sarbu I. Performance assessment of a ground-coupled heat pump for an office room heating using radiator or radiant floor heating systems // Procedia Engineering. 2015. Vol. 118. P. 88–100. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.407.

18. Performance evaluation of different heating terminals used in air source heat pump system / H. Bin, R.Z.Wang, B. Xiao, L. He, W. Zhang, Sh. Zhang // International Journal of Refrigeration. 2019. Vol. 98. P. 274–282. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.10.014.

Authors of the publication

Vyacheslav I. Maksimov– National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Amer Saloum– National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Поступила в редакцию

18 января 2019 г.



УДК 621.3.072

СТЕНД ДЛЯ ПОСЛЕРЕМОНТНЫХ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

О.В. Владимиров¹, И.В. Ившин¹, М.Ф. Низамиев¹, А.Н. Цветков¹, И.К. Усманов²,
Р.Р. Гибадуллин¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ООО «ТаграС-ЭнергоСервис», г. Альметьевск, Россия

Резюме: В статье рассмотрены вопросы объективной оценки технического состояния асинхронных двигателей напряжением до 1000 В. Предложен стенд для послеремонтных испытаний. Испытательный стенд позволяет проводить испытания асинхронных двигателей, формировать объективное заключение о техническом состоянии и качестве проведенного ремонта в автоматическом режиме.

Ключевые слова: оценки технического состояния, испытательный стенд, асинхронные двигатели, программное обеспечение.

Благодарности: Работа, по результатам которой написана статья, выполнена в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по договору № 23/2015 от 30.09.2015 г., заключенному между ООО «ТаграС-ЭнергоСервис» и ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

STAND FOR AFTER REPAIR TESTS OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH VOLTAGE UP TO 1000 V

O.V. Vladimirov¹, I.V. Ivshin¹, M.F. Nizamiev¹, A.N. Tsvetkov¹, I.K. Usmanov²,
R.R. Gibadullin¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²ООО «Tagras-Energoservis», Almeteyevsk, Russia

Abstract: This article deals with the issues of an objective assessment of the technical condition of asynchronous motors with voltage up to 1000 V. A stand is proposed for post-repair tests. Test stand allows you to conduct induction motor tests to form an objective conclusion about the technical condition and quality of the repair carried out automatically.

Keywords: technical condition assessment, test bench, asynchronous motors, software.

Acknowledgments: The work, which resulted in an article, was performed as part of research and development work under Contract No. 23/2015 of September 30, 2015, concluded between ООО Tagras-Energoservis and Kazan State Power Engineering University.

For citation: Vladimirov O.V., Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Tsvetkov A.N., Usmanov I.K., Gibadullin R.R. Stand for after repair tests of asynchronous motors with voltage up to 1000 V. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):52-58. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-52-58.

В настоящее время существует проблема оценки технического состояния асинхронных двигателей напряжением до 1000 В, отправляемых в ремонт и возвращаемых из капитального ремонта с целью планирования объемов ремонтных работ.

Существующие на сегодняшний момент стенды для послеремонтных испытаний двигателей до 1000 В обладают рядом существенных недостатков (высокая стоимость, ограниченная функциональность и неудовлетворение требований заказчика). Применяемые программы послеремонтной приемки двигателей, с «ручными» измерениями параметров отличаются невысокой степенью достоверности, отсутствием автоматизации и необходимостью дополнительного контроля за измерениями и правильностью заполнения протоколов испытаний.

Таким образом, целесообразно, использовать автоматизированный стенд, позволяющий определять техническое состояние асинхронных двигателей после капитального ремонта, с возможностью формирования заключения о качестве проведенного ремонта в автоматизированном режиме, исключая ошибки персонала. Проведенный анализ существующих методов испытаний асинхронных электродвигателей и требования нормативных документов [1–7] показал необходимость разработки автоматизированного стенда и программы испытаний для оценки качества выполненного капитального ремонта.

В рамках сотрудничества Казанского государственного энергетического университета и ООО «ТаграС-ЭнергоСервис» был разработан и внедрен в производственный процесс стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей напряжением до 1000 В, осуществляющий комплекс испытаний, направленных на выявление дефектных узлов электродвигателей, поступающих в ремонт и прошедших капитальный ремонт, в автоматическом режиме.

Испытательный стенд состоит из следующих узлов (рис. 1):

- аппаратно-программный комплекс, включающий в себя персональный компьютер 1 и печатающее устройство 2;
- главный щит 3, включающий в себя контрольно-измерительные приборы;
- система силового питания, включающая в себя разъем 4 для подключения электродвигателей различных габаритов и обеспечения безопасности персонала, испытуемый электродвигатель 5 и испытательный стол 6;
- система датчиков.

Составные части испытательного стенда располагаются в отдельном защищенном помещении. Испытательный стол 6 располагается в зоне испытания электродвигателей. Исследуемый объект (электродвигатель) 5 крепится на испытательном столе. На электродвигатель устанавливается система датчиков. В верхней части стойки расположен главный щит 3.

Все электрические блоки соединяются друг с другом и с исполнительными элементами силовыми линиями и линиями передачи информации. Электродвигатель подключается к испытательному стенду через разъем 4, установленный на стене для обеспечения безопасности при подключении и отключении объекта испытания.

Перед проведением испытаний исследуемый электродвигатель 5 устанавливается на испытательном столе 6 и соединяется линией силового питания с главной стойкой через разъем 4. Кроме этого, на корпусе электродвигателя закрепляются датчики вибрации, датчики температуры и датчик частоты вращения вала.

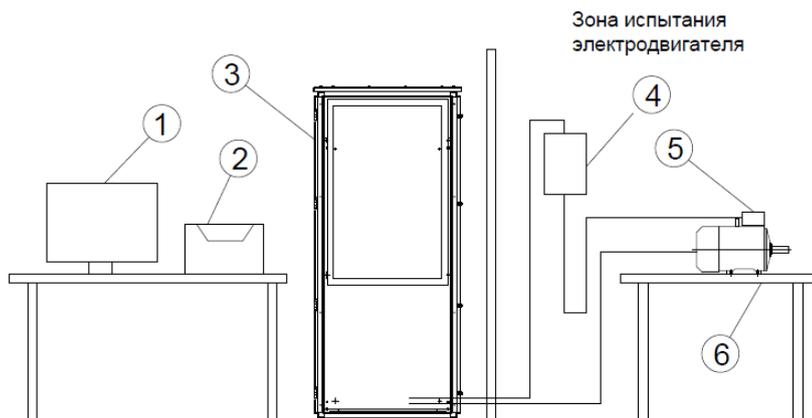


Рис. 1. Состав испытательного стенда: 1 – персональный компьютер; 2 – печатающее устройство; 3 – главный щит; 4 –разъем; 5 – электродвигатель с установленными датчиками; 6 – испытательный стол

Основные технические характеристики испытательного стенда, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики испытательного стенда

Наименование характеристики	Значение
Напряжение питания, В	380
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений СКЗ виброскорости, измеряемой датчиками ИВД-3, %	±10
Класс точности измерительных трансформаторов тока ТТИ	0,5S
Основная приведенная погрешность измерений напряжения, %	0,5
Основная приведенная погрешность измерений токов, %	0,25
Основная приведенная погрешность измерений температур, %	0,25
Пределы допускаемой погрешности измерений оборотов двигателя, об/мин	±1
Пределы допускаемой погрешности измерений сопротивления изоляции, %	±3
Пределы допускаемой погрешности измерений в режиме проверки электрической прочности изоляции, %	±3
Уровень шума не более, дБл	43
Время непрерывной работы не более, час	10
Масса испытательного стола с аппаратурой, кг	100
Наработка на отказ не менее, ч	1000

Испытательный стенд включает в себя следующие контрольно-измерительные приборы:

- мегаомметр М4122U-RS;
- микроомметр марки М4104RS;
- измеритель параметров электрической сети МЭ110-220.3М;
- модуль ввода аналоговых сигналов МВ110-8А;
- модуль вывода дискретных сигналов МУ110-16Р;
- датчик вибрации ИВД-3Ц-3 К8М0;
- тахометр ТХ01;
- термопреобразователь сопротивления ДТС 014.

Мегаомметр М4122U-RS используется для измерения сопротивления изоляции электрических цепей двигателя повышенным напряжением. Кроме этого, с помощью

мегаомметра вычисляются значения коэффициента диэлектрической абсорбции и индекса поляризации для выявления качества изоляции и ее увлажненности, что позволяет исключить из программы испытания диагностику состояния обмоток повышенным напряжением и сократить длительность испытания.

Микроомметр M4104RS применяется для измерения сопротивления обмоток двигателей постоянному току, не находящихся под напряжением, с целью определения правильности изготовления и соединения. С помощью данного прибора определяется величина и разброс сопротивления обмоток электродвигателя по фазам.

Измеритель параметров электрической сети (МЭ110-220.3М) используется для измерения напряжения, силы тока, частоты, мощности, фазового угла и коэффициента мощности, потребляемых испытываемым электродвигателем, преобразования измеренных параметров в цифровой код и передачи результатов измерений в программный комплекс для дальнейшей обработки с целью определения технического состояния электрической силовой части.

Модуль ввода аналоговых сигналов MB110-8A предназначен для преобразования в цифровой код результатов измерения температуры окружающего воздуха и основных элементов испытываемого электродвигателя, и частоты вращения вала электродвигателя, полученной от тахометра. Прибор представляет собой универсальный 16-ти разрядный аналогово-цифровой преобразователь, работает в сети RS-485 и способен обмениваться информацией со всеми элементами аппаратно-программного комплекса.

Модуль вывода дискретных сигналов ОВЕН МУ110-16Р применяется для управления исполнительными механизмами и подачи дискретных команд управления на измерительные приборы. Прибор управляется от программного комплекса стенда.

Датчик вибрации ИВД-3Ц-3 К8М0 обеспечивает измерение СКЗ виброскорости по трем взаимоперпендикулярным направлениям.

Датчик работает следующим образом:

- преобразует сигнал чувствительного элемента в напряжение и ток, пропорциональные виброускорению;
- производит низкочастотную и высокочастотную фильтрацию аналогового сигнала;
- выполняет аналого-цифровое преобразование с частотой дискретизации 25000 Гц;
- осуществляет интегрирование ускорения и расчет СКЗ виброскорости;
- оцифровывает полученные данные и преобразует их в вид, предназначенный для передачи в интерфейс RS-485 для дальнейшей обработки программным комплексом.

Тахометр ТХ01 осуществляет согласование датчика частоты вращения вала исследуемого электродвигателя и модуля ввода аналоговых сигналов MB110 для дальнейшей оцифровки измеренной величины.

Термопреобразователь сопротивления ДТС 014 используется для непрерывного измерения температуры электрического двигателя. Датчик преобразует изменение температуры в изменение электрического сопротивления постоянному току. Датчик имеет платиновый чувствительный элемент типа Pt100 и компенсацию сопротивления соединительных проводов.

Внешний вид испытательного стенда показан на рис. 2.

Система управления стендом построена на базе персонального компьютера с предустановленным программным обеспечением, необходимым для реализации уникального алгоритма управления.

Стенд работает следующим образом. Напряжение сети подается на главный щит, откуда по командам системы управления подается на исследуемый электродвигатель по каналу питания. По этому же каналу путем перекоммутации осуществляется измерение основных параметров обмотки электродвигателя. Система управления получает от

испытываемого двигателя частоту вращения вала, величину вибрации переднего и заднего подшипников, температуру переднего и заднего подшипников и обмотки.

Система управления стендом построена на программной реализации алгоритма управления. Алгоритм заложен в коде программы и позволяет запускать отдельные части программы испытания по команде оператора.



Рис. 2. Внешний вид испытательного стенда

Программное обеспечение создано в среде объектно-ориентированного программирования *VisualBasic* и представляет собой автономно функционирующий модуль с применением стандартных библиотек. Программное обеспечение имеет широкие возможности настройки процесса испытания, задания режимов работы, вычисления дополнительных величин на основе полученных данных.

Полученные данные преобразуются в вид, используемый для дальнейшей обработки, индикации и архивации. В программе реализованы решения по визуализации полученных и вычисленных данных, которые помогают оператору в кратчайшие сроки определить причину проявившихся дефектов, отображаемых в виде величин, выходящих за допустимые пределы.

В программе реализован модуль обработки ошибок, помогающий оператору оперативно отлаживать и настраивать работу системы. Модуль выдает код и расшифровку возникшей ошибки, а также рекомендации по ее устранению. Это, в свою очередь, сокращает время простоев оборудования и общую длительность испытания.

Программа работает следующим образом. Изначально производится инициализация всех требуемых процедур и устройств связи. После запуска программа осуществляет постоянный контроль портов связи и принимает поступившие в них данные. Основной частью программы является модуль обмена данными с приборами, осуществляющий прием данных и рассылку команд исполнительным устройствам.

Программа обладает мощным графическим интерфейсом, позволяющим визуализировать процесс испытания и отображать результаты в удобном для восприятия виде. Полученные данные хранятся в файле, имеющем информацию о дате и времени проведения испытания и основные данные объекта испытания. На основе полученных данных формируется протокол, содержащий результаты испытаний и заключение о состоянии объекта испытаний.

На рис. 3 показан внешний интерфейс программы во время испытания асинхронного двигателя.

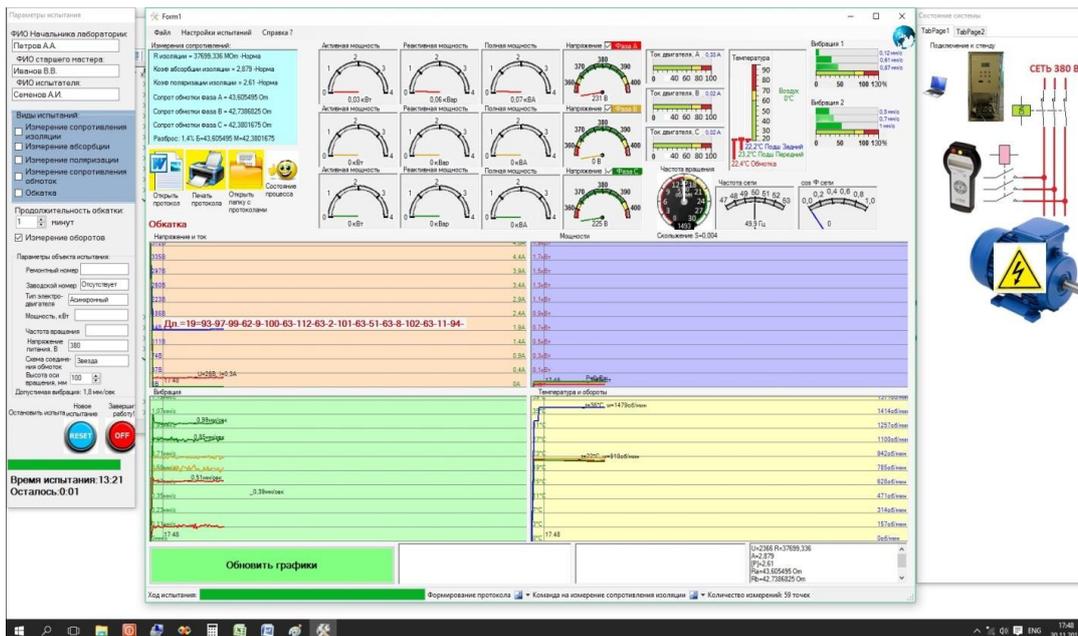


Рис. 3. Работа программы при испытании

Результатом работы программы является формирование протокола испытаний, заключения о состоянии асинхронного двигателя и вывод на печать или сохранение его в архиве протоколов.

Пример протокола испытаний двигателя с ремонтным номером AST135 мощностью 15 кВт показан на рис. 4.

Протокол испытания

дата и время: 13.12.2017 17:10:08

Параметры двигателя:
 Ремонтный номер: AST135
 Серийный номер: Отсутствует
 Тип двигателя: Асинхронный
 Мощность: 15 кВт
 Частота вращения: 1500 об/мин
 Напряжение: 380
 Длительность испытания: 33:42 мин:сек
 Длительность обкатки: 30 минут

1. Измерение сопротивления изоляции, МОм.
 Прибор: M4122U-RS №4873

Согласно РД	Фактически	Заключение
≥ 1,0 Мом	4144,961	Соотв.

2. Измерение коэффициента абсорбции.
 Прибор: M4122U-RS №4873

Согласно РД	Фактически	Заключение
≥ 1,3	2,111	Соотв.

3. Измерение коэффициента поляризации.
 Прибор: M4122U-RS №4873

Согласно РД	Фактически	Заключение
≥ 1,0	----	Не измерено

4. Сопротивление обмоток постоянному току, Ом.
 Прибор: M4104-RS №1369RS

Фаза А	Фаза В	Фаза С	Допустимый разброс	Фактический разброс	Заключение
43,375	43,557	43,095	≥2%	0,42	Соотв.

5. Обкатка электродвигателя.

Режим испытания	Ток, А	Напряжение, В	Температура статора С°	Заключение
х/х	0,31	216	22,1	Соотв.

6. Вибрация электродвигателя, мм/сек.
 Прибор: Датчики вибрации ИВД-3, зав. № 544947, 544948

Точки замеров	Передний	Задний
Y – вертикальный, мм/сек	0,49	0,28
X – горизонтальный, мм/сек	0,37	0,37
Z – осевая, мм/сек	0,84	0,68
Температура подшип. С°	23	22

Предельная вибрация 1,8 мм/сек
 Заключение Удов.летвор.

Заключение по результатам испытаний
 Общее заключение Электродвигатель годен
 Испытания проводит: Семенов А.И.
 Проверил ст. мастер Иванов В.В.
 Начальник лаборатории Петров А.А.

Рис. 4. Протокол испытания двигателя с ремонтным номером AST135 мощностью 15 кВт

Выводы

Созданный испытательный стенд позволяет проводить автоматизированные послеремонтные испытания асинхронных двигателей напряжением до 1000 В с выявлением соответствия параметров двигателя номинальным значениям и формировать протоколы испытаний и заключения о состоянии объекта с выводом на печать или сохранением его в архиве протоколов.

Литература

1. Шарипов Р.Р. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей до 1000 В // Материалы XXXVII международной научно-практической конференции Actual scientific research 2018. 2018. С. 741–742.
2. Приходько В.М. Выявление методов послеремонтных испытаний судовых электрических машин / В.М. Приходько, В.Ю. Лучкин, И.В. Приходько // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. С. 383–391.
3. Харламов В.В. Методика определения мощности и математическое моделирование физических процессов при испытании асинхронных тяговых двигателей методом взаимной нагрузки / В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 5 (51). С. 42–48.
4. Ремезовский В.М. Метод контроля параметров электрического двигателя на основе анализа пусковых токов / В.М. Ремезовский, А.Б. Власов, В.А. Мухалёв // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2015. № 1. С. 143–148.
5. Кочин А.Е. Система для испытания электрических машин по методу взаимной нагрузки / А.Е. Кочин, С.А. Васильченко // Транспорт: наука, образование, производство. 2017. С. 168–171.
6. Шашков И.В. Стенд для испытания асинхронного двигателя в автоколебательном режиме / И.В. Шашков, Ю.А. Рудченко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2016. № 2 (65). С. 86–93.
7. Basak D. Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines / D. Basak. Industrial Technology. 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on. 2006. 3061. 3066 p.
8. Кузьменко Н.В. Разработка измерительного стенда для улучшения качества испытаний асинхронных двигателей / Н.В. Кузьменко, В.В. Куликов, А.А. Демин // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2017. Т.1 99–100.
9. Авилов В.Д. Модернизированный стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии». 2013. С. 137–141.
10. Харламов В.В. Универсальный энергоэффективный стенд для нагрузочных испытаний тяговых асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока / В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов // Известия Транссиба. 2016. № 3 (27). С. 58–66.

Авторы публикации

Владимиров Олег Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ившин Игорь Владимирович – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Усманов Ильнур Кабирович – заместитель главного инженера – начальник производственно-технического отдела ООО «ТаграС-ЭнергоСервис».

Гибадуллин Рамил Рифатович – канд. техн. наук, доцент, кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Sharipov R.R. Stand for post-repair testing of asynchronous motors up to 1000 V // Proceedings of XXXVII International Scientific and Practical Conference Actual scientific research 2018. 2018. P. 741–742.
 2. Prikhodko V.M. Identification of methods for post-repair testing of ship electrical machines / V.M. Prikhodko, V.Yu. Luchkin, I.V. Prikhodko // Collection of scientific works of the faculty of the State University of Maritime and River Fleet named after admiral SO Makarova. 2017. P. 383–391.
 3. Kharlamov V.V. Method of determining the power and mathematical modeling of physical processes in the testing of asynchronous traction motors by the method of mutual load / V.V. Kharlamov, D.I. Popov, A.V. Litvinov // Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy. 2016. № 5 (51). P. 42–48.
 4. Remezovsky V.M. The method of monitoring the parameters of an electric motor based on the analysis of starting currents / V.M. Remezovsky, A.B. Vlasov, V.A. Mukhalev // Bulletin of the Murmansk State Technical University. 2015. № 1 P. 143–148.
 5. Kochi A.E. System for testing electric machines by the method of mutual load / A.E. Cochin, S.A. Vasilchenko // Transport: science, education, production. 2017. P. 168–171.
 6. Shashkov I.V. Stand for testing an asynchronous motor in self-oscillatory mode / I.V. Shashkov, Yu.A. Rudchenko // Bulletin of the Gomel State Technical University. BY. Dry. 2016. № 2 (65). P. 86–93.
 7. Basak D. Fault diagnosis and industrial machines / D. Basak. Industrial Technology. 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on. 2006. 3061 3066 p.
 8. Kuzmenko N.V. Development of a test bench for improving the quality of testing induction motors / N.V. Kuzmenko, V.V. Kulikov, A.A. Demin // Modern technologies and scientific and technical progress. 2017. Vol.1 P. 99–100.
 9. Avilov V.D. Modernized stand for testing asynchronous motors by the method of mutual load / V.D. Avilov, D.I. Popov, A.V. Litvinov // Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference "Improving the efficiency of operation of collector electromechanical energy converters." 2013. P. 137–141.
- Kharlamov V.V. Universal energy-efficient stand for load testing of traction asynchronous motors and DC motors / V.V. Kharlamov, D.I. Popov, A.V. Litvinov // Transsiba JOurnal. 2016. № 3 (27). P. 58–66.

Authors of the publication

Oleg V. Vladimirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

© *О.В. Владимиров, И.В. Ившин, М.Ф. Низамиев, А.Н. Цветков, И.К. Усманов, Р.Р. Гибадуллин*

Marat F. Nizamiev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Alexey N. Tsvetkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Ilnur K. Usmanov – ООО «Tagras-Energoservis», Almet'yevsk, Russia

Ramil R. Gibadullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Поступила в редакцию

14 декабря 2018 г.



ВЫБОР ВАРИАНТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ И КРИТЕРИЕВ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

А.В. Малафеев, А.И. Юлдашева

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1471-9764>, malapheev_av@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1403-4434>, alinayuldasheva1@gmail.com

Резюме: в статье предлагается методика выбора вариантов реконструкции системы электроснабжения на основе критериев теории принятия решений. Процесс реконструкции рассматривается в виде последовательной игры с участием двух игроков: активного и пассивного. Вероятность возможных состояний системы определяется на основе теории нечетких множеств. Основным критерием выбора варианта реконструкции принято значение ущерба от нарушения электроснабжения. Рассмотрено применение предложенной методики на примере крупного металлургического предприятия.

Ключевые слова: система электроснабжения, теория нечетких множеств, теория принятия решений, граф игры, критерий Байеса, вероятный ущерб.

SELECTION OF OPTIONS FOR THE RECONSTRUCTION OF THE POWER SUPPLY SYSTEM BASED ON THE FUZZY SETS THEORY AND THE CRITERIA OF DECISION-MAKING THEORY

A.V. Malafeev, A.I. Iuldasheva

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1471-9764>, malapheev_av@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1403-4434>, alinayuldasheva1@gmail.com

Abstract: The article proposes a method for selecting options for the reconstruction of the power supply system based on the criteria of decision-making theory. The reconstruction process is considered as a sequential game with two players: active and passive. The probability of possible states of the system is determined on the basis of the fuzzy sets theory. The main criterion for the choice of the reconstruction option is the value of damage from the power supply interruption. The application of the proposed method is considered on the example of a large metallurgical enterprise.

Keywords: power supply system, fuzzy sets theory, decision-making theory, game flow chart, Bayes criterion, probable damage.

For citation: Malafeev A.V., Iuldasheva A.I. Selection of options for the reconstruction of the power supply system based on the fuzzy sets theory and the criteria of decision-making theory. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21 (3-4):59-67. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-59-67.

Введение

Усложнение технологии и укрупнение производства привело к необходимости применять различные математические расчеты при решении вопросов управления. Одним из вопросов, требующих применения достаточно сложного математического аппарата, является планирование развития и реконструкции энергосистем в целом, сетей магистральных и территориальных сетевых компаний, систем электроснабжения крупных промышленных предприятий. Для последних характерно коренное изменение схемы с полной заменой оборудования какого-либо участка электрических сетей при замене крупного энергоемкого технологического оборудования или при внедрении нового технологического процесса (в частности, для металлургических предприятий – это выплавка и доводка стали в электродуговых печах, сооружение новых энергоемких установок по очистке дымовых газов и др.). При этом в процессе сооружения и ввода в эксплуатацию новых объектов могут измениться условия финансирования, фактически приобретаемое оборудование может не соответствовать запланированному, могут иметь место схемные изменения, фактическая нагрузка будет отличаться от проектной. Это говорит о неопределенности ряда факторов; какая-либо статистическая информация при этом отсутствует, в особенности при внедрении новых технологий. Наиболее удобным подходом к учету такой неопределенности является применение теории нечетких множеств, которая является достаточно мощным стратегическим инструментом управления сложными системами. Как отмечено [1], на практике постоянно приходится принимать решения в условиях неполной информации, и, поскольку математический аппарат теории нечетких множеств позволяет моделировать рассуждения человека, то технологии и алгоритмы, разработанные в рамках этой теории, являются универсальными по применимости. Теория нечетких множеств нашла применение для решения различных задач и в области энергетики: для принятия решений при управлении реконструкцией энергообъектов; при определении стратегии восстановления электроснабжения после аварии; при диагностировании повреждений в сетях и др. [2]. В работе [2] делается вывод о том, что использование нечетких множеств при выборе вариантов реконструкции схем выдачи мощности электростанций дает возможность формализовать эту операцию при неопределенности информации и при противоречивости правил и критериев. В статье [3] на примере выбора оптимального варианта повышения эффективности воздушных линий электропередач, работающих в экстремальных условиях окружающей среды, представлен алгоритм решения многокритериальных задач оптимизации с неопределенной информацией. Делается вывод о том, что при принятии решений необходим комплексный подход к формулированию и применению принципов оценки эффективности инвестиций в проекты реконструкции (таких, как принцип доминирования, Парето-оптимальные альтернативы, формирование комплексных показателей, выделение главного показателя и перевод остальных в разряд ограничений, отбор недоминирующих альтернатив, аддитивной свертки). В работе [4] продемонстрировано применение теории нечетких множеств для оценки производственных рисков для промышленной системы электроснабжения. В [5] разработан алгоритм выбора оптимальных параметров систем электроснабжения, позволяющий решать задачи планирования в многокритериальной постановке с учётом нескольких неопределённых факторов. В качестве критериев эффективности и надёжности приняты дисконтированный недоотпуск электроэнергии потребителям из-за вероятных отключений и чистый дисконтированный доход. Кроме того, в работе обоснован рациональный набор неопределённых факторов и способ получения дополнительной информации, что повышает эффективность учёта неопределённости исходной информации в оптимизационных задачах СЭС и решать их с помощью статистических методов, в частности критерия Байеса. Представленная в статье [6] методика многокритериального анализа моделей развития систем электроснабжения в условиях неопределенности позволяет исключить субъективизм, связанный с выбором

наиболее вероятного значения электропотребления и рассмотреть множество вариантов из прогнозного диапазона. Разработана система критериев оценки моделей развития, отражающая экономический, технический и архитектурно-градостроительный аспекты (суммарные дисконтированные затраты, технические потери электроэнергии, недоотпуск электроэнергии, протяженность линий электропередачи) и разработаны их математические модели с учетом неопределенности информации. Для оценки эффективности инвестиционных программ по реконструкции в работе [7] предлагается использование моделей надежности на основе однородных цепей Маркова, требующее, однако, детальной информации о результатах реконструкции. Оценке рисков режимного характера при планировании развития распределенной генерации с учетом неопределенности нагрузки, генерации, цен на энергоносители посвящена работа [8]. В [9] предложена методика оценки такого риска при каскадном развитии аварии в условиях широкого применения в распределительных сетях блочно-модульных подстанций и другого современного оборудования на основе теории D-S-доказательств. Применение метода последовательного эквивалентирования для оценки надежности рассмотрено в работе [10].

При сравнении вариантов реконструкции заводской электрической сети в случае расширения производства с учетом ущерба от нарушения электроснабжения к неопределенным (или частично неопределенным) величинам можно отнести:

- 1) отклонение фактического увеличения нагрузки от проектного значения;
- 2) характер аварийной ситуации;
- 3) время отключения с учетом отыскания места повреждения.

Далее в работе рассмотрен учет первого из названных факторов.

Методика выбора вариантов реконструкции системы электроснабжения

Масштабная реконструкция сопровождается, как правило, поэтапным вводом в строй производственных объектов и отдельных участков системы электроснабжения. При этом в процессе ввода в эксплуатацию новых и реконструированных объектов может потребоваться корректировка решений по реализации очередного этапа. В связи с этим необходимо рассматривать задачу планирования в таких условиях как динамическую. Представим этот процесс как последовательную игру [11] с участием двух игроков: организации, осуществляющей комплекс работ по реконструкции (активный игрок А), и «природы» (пассивный игрок П). Действие «природы» определяется отклонением фактической нагрузки объекта от проектной, изменением цен на электроэнергию в сравнении с прогнозными, возможностью возникновения аварийных ситуаций различного вида и различным временем их ликвидации. В зависимости от текущей ситуации возможно принятие различных решений по дальнейшей реконструкции, в связи с чем целесообразно рассматривать процесс реконструкции как игру в смешанных стратегиях, число ходов в которой $2N$ (N – количество этапов). Вероятность того или иного состояния «природы» (хода игрока П) будем определять на основе теории нечетких множеств, считая фактическую нагрузку в результате реконструкции системы электроснабжения односторонним нечетким числом. Будем в этом качестве использовать числа с функцией принадлежности, заданной кривой Коши, параметризованной по уровню 0,5 [12]. В данном случае она будет иметь следующий вид:

$$\mu(P) = \frac{1}{1 + \left(\frac{P - P_{гр}}{P_{сп} - P_{гр}} \right)^2}, \quad (1)$$

где P – фактическая нагрузка в результате реконструкции; $P_{гр}$ – граничное значение нагрузки, соответствующее правой границе ядра нечеткого интервала; в качестве

граничного значения будем принимать проектное значение расчетной нагрузки; P_{cp} – нагрузка, соответствующая десятипроцентному превышению фактической нагрузки над проектным значением (погрешность в 10 % соответствует определению расчетных нагрузок методом расчетных коэффициентов, применяемым сейчас в проектной практике (см., например, [12]); $P_{cp} = 1,1 P_{rp}$.

Необходимо минимизировать проигрыш игрока А, в качестве которого примем ущерб от нарушения надежности электроснабжения при реализации какого-либо варианта. Тогда роль платежной функции будет выполнять проигрыш игрока А после выполнения очередного хода.

Структура графа игры для двух этапов реконструкции показана на рис. 1.

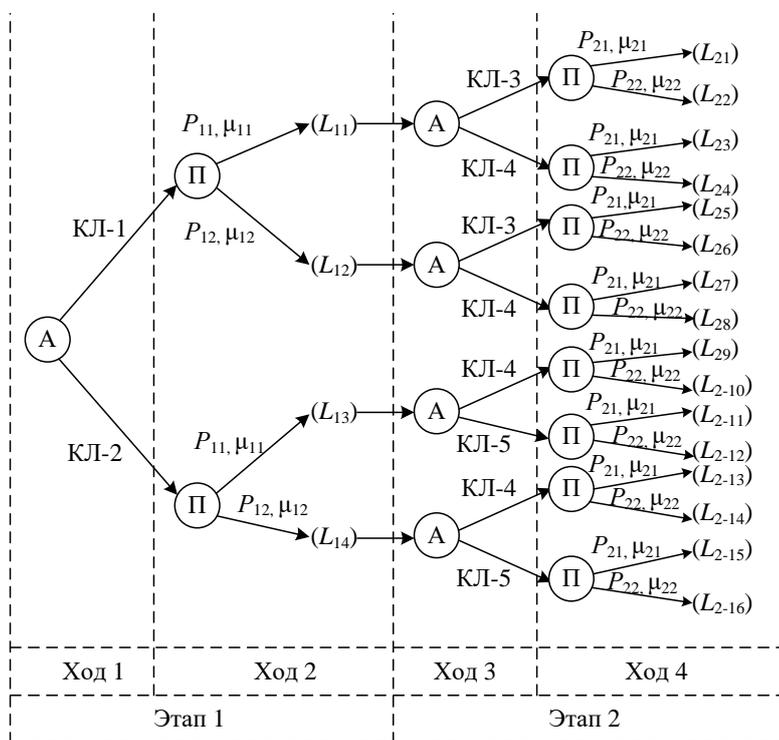


Рис. 1. Общий вид графа игры, соответствующего реконструкции системы электроснабжения в два этапа

Здесь КЛ-1 ... КЛ-5 – элементы реализуемой стратегии – вводимые участки системы электроснабжения; P_{11} , P_{12} и P_{21} , P_{22} – возможные значения нагрузки реконструированного участка на первом и втором этапах, соответственно, с вероятностями p_{11} , p_{12} , p_{21} , p_{22} . D_{11} ... D_{14} – значения проигрыша, соответствующие реализации двух вариантов (сооружение КЛ-1 или КЛ-2) первого этапа, при величинах нагрузки P_{11} или P_{12} ; значения D_{21} ... D_{2-16} – аналогичные значения при последующем сооружении КЛ-3 или КЛ-4 и нагрузке P_{21} (P_{22}). В качестве проигрыша D будем использовать приведенные затраты с учетом ущерба.

В качестве критерия принятия решений возьмем критерий Байеса, позволяющий оперировать субъективными вероятностями состояний природы. В качестве вероятностей будем использовать значения функции принадлежности (ФП) по выражению (1). В этом случае проигрыш на i -м этапе реконструкции будем определять следующим образом:

$$L_{is}(i) = \sum_{a(i)} \mu_{ia(i)} D_{is(i)a(i)}, \quad (2)$$

где $s(i)$ – номер выбранной стратегии; $a(i)$ – состояние природы на i -м этапе; $\mu_{ia(i)}$ – значение ФП для состояния $a(i)$; $D_{is(i)a(i)}$ – проигрыш, включающий капиталовложения, приведенные к одному году, и ущерб от нарушения электроснабжения при реализации стратегии $s(i)$ и состоянии природы $a(i)$.

При учете степени доверия игрока А к принятому распределению может быть использован критерий Ходжа-Лемана, являющийся комбинацией критериев Байеса и Вальда. Выражение для проигрыша в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$L_{is}(i) = \lambda \sum_{a(i)} \mu_{ia(i)} D_{is(i)a(i)} + (1-\lambda) \max_{1 \leq i \leq N} (D_{is(i)a(i)}), \quad (3)$$

где $\lambda \in [0;1]$ – степень доверия.

При отсутствии каких-либо предпочтений (при $\lambda=0$) получаем критерий Вальда:

$$L_{is}(i) = \max_{1 \leq i \leq N} (D_{is(i)a(i)}). \quad (4)$$

При использовании любого из указанных критериев окончательный вариант реконструкции будет выбираться по критерию минимального проигрыша $\min L_{Ns}(N)$ на последнем этапе.

Практическое применение

В качестве примера рассмотрена реконструкция крупного металлургического предприятия. Планируется сооружение установок аспирации, для питания которых предусмотрено строительство новой ПС-11 110/10 кВ. Нагрузка ПС составит $S_1=80$ МВА. Планируется осуществлять внешнее электроснабжение ПС-11 110кВ от ПС-60 и ЦЭС; для обеспечения более надежного электроснабжения предусмотрено строительство дополнительных линий от ПС – 30, 62, 85.

Варианты схем подключения ПС-11 показаны на рис. 2.

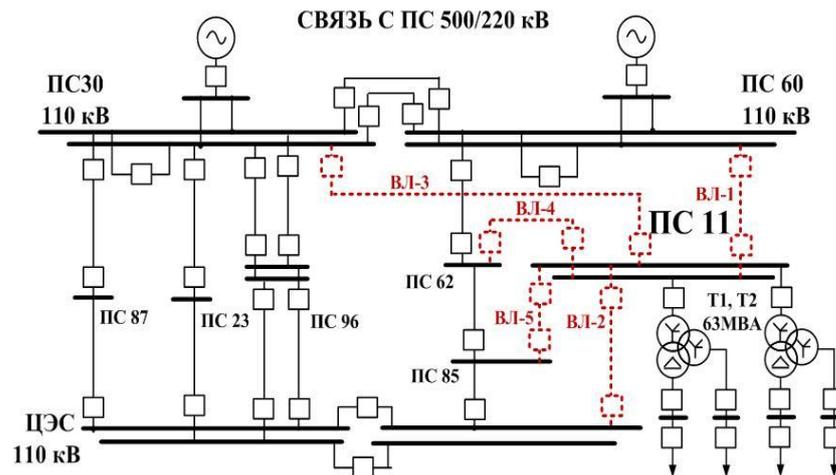


Рис. 2. Возможные схемы подключения ПС-11

Для предложенных схемных решений построен граф игры (рис. 3).

Как было отмечено выше, выбор окончательного варианта реконструкции осуществляется исходя из критерия минимального суммарного проигрыша по принятому

критерию (Байеса, Ходжа-Лемана, Вальда) $\min L_{iS}$ на последнем этапе. При этом ущерб, как составляющая проигрыша, определяется следующим образом:

$$Y_{is} = y_0 T_R \Delta P_{is}, \quad (5)$$

где y_0 – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителя, определяемый временем перерыва и характером производства, руб./кВт·ч (для предприятий черной металлургии $y_0=18,3$ руб/кВт·ч [14]); T_R – время восстановления; ΔP_{is} – мощность, недоотпущенная потребителю вследствие нарушения электроснабжения с учетом значения ФП μ_{ij} при работе с данным значением P_{is} ($\Delta P_{is} = |P_1 - P_{is}| p_{is}$, где $P_1=64$ МВт – нагрузка, предусмотренная проектом).

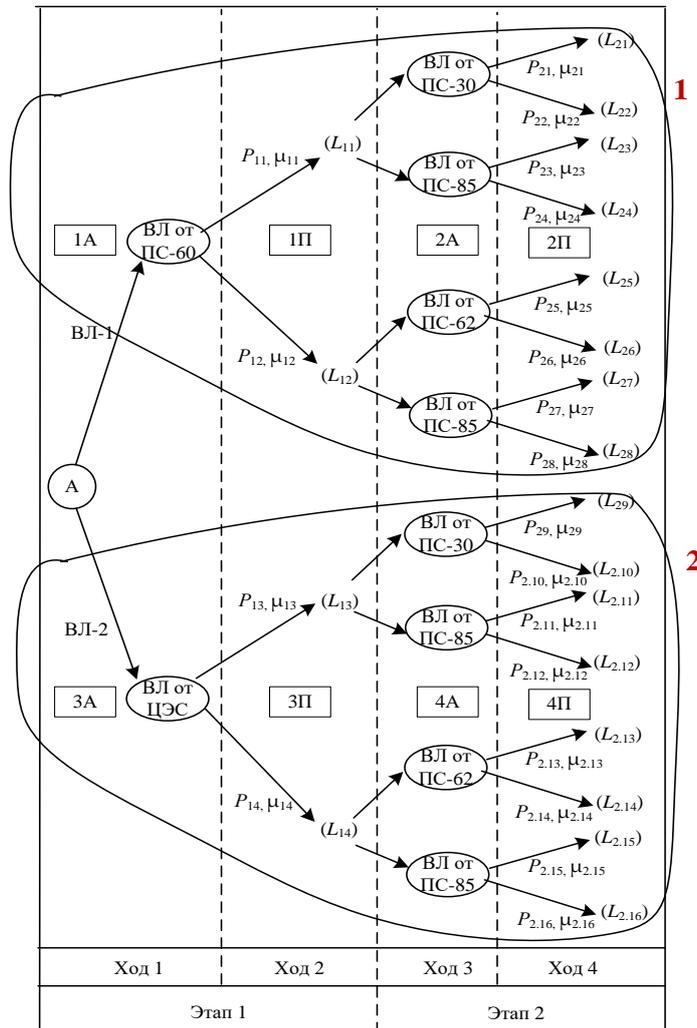


Рис. 3. Граф игры, соответствующий строительству ПС-11

Для предложенных вариантов схем произведена оценка капиталовложений K , и с помощью ПК КАТРАН [15, 16] рассчитаны показатели надежности (параметр потока отказов ω и время восстановления T_R). Полученные результаты представлены в табл. 1. Во всех рассмотренных вариантах принято строительство линий электропередачи 110 кВ на

металлических опорах с использованием проводов марки АСУ-400, сооружение 1 км которых составит 0,55 млн руб/км [17], параметр потока отказов $\omega=0,0128$ 1/год на 1 км [17].

Для корректного сравнения полученных значений учитывались значения капитальных вложений (значения приведены в табл. 1) в каждый из проектов реконструкции. Таким образом, проигрыш, представляющий собой приведенные затраты с учетом ущерба V_{is} , будет определяться следующим образом:

$$D_{is} = V_{is} + K_{is} E_H \quad (6)$$

где E_H – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ($E_H = 0,12$).

Таблица 1

Варианты подключения ПС-11 и соответствующие им капиталовложения и показатели надежности

Стратегия	Сооружаемые линии	Суммарная длина, км	Суммарные капиталовложения, млн руб.	ω , 1/год	T_R , год
1	ПС-60 – ПС-11	5,2	2,86	0,000010	0,003948
	ПС-60 – ПС-11; ПС-30 – ПС-11	11,5	6,33	0,080650	0,000801
	ПС-60 – ПС-11; ПС-85 – ПС-11	12,3	5,45	0,060170	0,000801
	ПС-60 – ПС-11; ПС-62 – ПС-11	9,9	6,77	0,090890	0,000801
2	ЦЭС – ПС-11	2,8	1,54	0,000005	0,003256
	ЦЭС – ПС-11; ПС-30 – ПС-11	9,1	5,01	0,080645	0,000768
	ЦЭС – ПС-11; ПС-85 – ПС-11	9,9	4,13	0,060165	0,000768
	ЦЭС – ПС-11; ПС-62 – ПС-11	7,5	5,45	0,090885	0,000768

Результаты расчета проигрыша приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета суммарных проигрышей по графу игры

Стратегия	Описание хода	Значение нагрузки P_{ia}	Величина ФП μ_{is}	Проигрыш D_{is} млн руб.	Суммарный проигрыш при P_{i1}	Суммарный проигрыш при P_{i2}	
1	1А: Сооружение ВЛ-1 (от ПС-60) 1П: Рост нагрузок	$P_{11}=1,2P_1$	0,2	10,064	10,064	34,364	
		$P_{12}=1,05P_1$	0,8	34,364			
	2А: Сооружение ВЛ-3, 4, 5 (от ПС-30, 62, 85) 2П: Рост нагрузок	От ПС-30	$P_{21}=1,15P_1$	0,31	3,667	13,731	38,031
			$P_{22}=1,3P_1$	0,1	1,828	11,892	36,192
		От ПС-85	$P_{23}=1,1P_1$	0,5	5,173	15,237	39,537
			$P_{24}=0,85P_1$	–	–	–	–
		От ПС-62	$P_{25}=1P_1$	–	–	–	–
			$P_{26}=0,9P_2$	–	–	–	–
2	3А: Сооружение ВЛ-2 (от ЦЭС) 3П: Рост нагрузок	$P_{13}=1,2P_1$	0,2	8,201	8,201	4,527	
		$P_{14}=1,3P_1$	0,1	4,527			

Продолжение таблицы 2

4А: Сооружение ВЛ-3, 4, 5(от ПС-30, 62, 85) 4П: Рост нагрузок	От ПС-30	$P_{2,9}=1,1P_1$	0,5	4,933	13,134	9,46
		$P_{2,10}=1P_1$	–	–	–	–
	От ПС-85	$P_{2,11}=0,8P_1$	–	–	–	–
		$P_{2,12}=1,15P_1$	0,31	3,283	11,484	7,81
	От ПС-62	$P_{2,13}=1P_1$	–	–	–	–
		$P_{2,14}=1,3P_1$	0,1	1,678	9,879	6,205
От ПС-85	$P_{2,15}=1,1P_1$	0,2	2,492	10,693	7,019	
	$P_{2,16}=0,95P_1$	–	–	–	–	

Как следует из табл. 2, наилучшая стратегия, характеризующаяся наименьшим проигрышем, – сооружение ВЛ от ЦЭС, затем вторым этапом – от ПС-62.

Заключение

В статье разработана усовершенствованная методика выбора вариантов многоэтапной реконструкции системы электроснабжения на основе подходов теории игр, отличающаяся от существующих методик возможностью учета вероятностей возможных состояний объекта в результате реализации каждого этапа.

Вероятность возможных состояний объекта предложено определять на основе теории нечетких множеств, используя числа с функцией принадлежности, заданной кривой Коши. Процесс реконструкции представляется в виде последовательной игры с участием активного игрока (службы, ответственной за планирование работ по реконструкции) и пассивного игрока («природы»), что позволяет учесть все возможные изменения внешних факторов и сочетания принимаемых решений на каждом этапе. В качестве основного критерия выбора варианта реконструкции принято значение затрат с учетом ущерба от нарушения надежности электроснабжения; выбирать предлагается исходя из критерия минимального проигрыша на последнем этапе. Методика допускает коррекцию принятой стратегии по результатам реализации любого из этапов.

В качестве примера рассмотрено два этапа реконструкции системы электроснабжения крупного металлургического предприятия при сооружении нового энергоемкого потребителя. В результате расчетов на основе графа игры выбран вариант, характеризующийся наименьшим значением проигрыша.

Литература

1. Коньшева Л.К., Назаров Д.М. Основы теории нечетких множеств. СПб : Питер, 2011. 192 с.
2. Коваленко И.В., Тремясов В.А. Применение теории нечетких множеств при выборе варианта реконструкции главных схем выдачи мощности электростанций // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2004. № 5/6. С. 26–32.
3. Шевченко Н.Ю., Лебедева Ю.В., Хавроничев С.В. Алгоритм выбора оптимального варианта реконструкции воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 10.
4. Малафеев А.В., Юлдашева А.И. Использование теории нечетких множеств для оценки производственных рисков при управлении режимами промышленной системы электроснабжения // Электроэнергетика глазами молодежи: тр. VI Междунар. науч.-техн. конф., 9–13 ноября 2015 г., г. Иваново. В 2 т. Т. 2. Иваново, 2015. С. 294–297.
5. Метельков А.А. Разработка методики планирования систем электроснабжения районов с малой плотностью нагрузок с учетом неопределенности исходной информации : дис. ... канд. технич. наук: 05.14.02 . М., 2004. 208 с.

6. Семенова Л.А. Многокритериальный анализ моделей развития систем электроснабжения в условиях неопределенности // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. № 4. С. 39–46.
7. Абдуллазянов Э.Ю., Васильев Ю.А., Галиев И.Ф. Модели надежности схем электроснабжения предприятий // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. №5-6. С. 67–74.
8. Abapour S., Zare K., Mohammadi-ivatloo B. Evaluation of technical risks in distribution network along with distributed generation based on active management // IET Generation, Transmission & Distribution. 2014. Vol. 8. Iss. 4. P. 609-618. doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0666.
9. Cunbin L., Gefu Q., Tingting Y. Operational Risk Assessment of Distribution Network Equipment Based on Rough Set and D-S Evidence Theory // Journal of Applied Mathematics. 2013. Article ID 263905. 7 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/263905>.
10. Юлдашева А.И., Малафеев А.В. Учет показателей надежности при планировании режима промышленной системы электроснабжения с собственными электростанциями // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №3(28). С. 36–40.
11. Дулякин В. М. Теория игр. Самара: Изд-во Самар. аэрокосм. ун-та, 2011. 191 с.
12. Коротеев М.В. Лингвистические переменные экономических показателей // Аудит и финансовый анализ. 2012. № 2. 5 с.
13. Кудрин Б.И., Жилин Б.В., Ошурков М.Г. Электроснабжение. Ростов-на-Дону: Феникс, 2018. 382 с.
14. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушения электроснабжения. – М: МЭИ , 2010. 187 с.
15. Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Панова Е.А., Варганова А.В., Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Зиновьев В. В., Савельева К.С., Юлдашева А. И., Крубцова А.А., Курилова Н.А., Свидетельство 2015662725 РФ. Программа «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 9.0», Оф. бюл. «Программы для ЭВМ, базы данных, ТИМС», 2015.
16. Малафеев А.В. Алгоритм расчета структурной надежности систем электроснабжения крупных промышленных предприятий на основе метода последовательного эквивалентирования // Известия РАН. Энергетика. 2016. №4. С. 62–72.
17. RUCABEL.RU [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rucabel.ru/asu/cabel_asu_400_93.html, свободный (дата обращения: 20.10.2018).
18. РД 34.20.574. Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.xjob.ru/РД_34.20.574, свободный (дата обращения: 20.10.2018).

Авторы публикации

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

Юлдашева Алина Илдаровна – аспирант Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

References

1. Konysheva L.K., Nazarov D.M. Fundamentals of the theory of fuzzy sets. - SPb.: Peter, 2011. 192 p.
2. Kovalenko I.V., Tremyasov V.A. Application of the theory of fuzzy sets in the problem of reconstruction options selection for the main power distribution schemes of power plants // Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems. 2004. No. 5-6. P. 26–32.
3. Shevchenko N.Yu., Lebedeva Yu.V., Havronichev S.V. The algorithm for selection of optimal variant for the reconstruction of overhead transmission lines of 110–220 kV// Modern problems of

science and education. 2013. No. 5. P. 10.

4. Malafeev A.V., Yuldasheva A.I. Application of the fuzzy sets theory for assessment of production risks in the task of modes control for the industrial power supply system // Electrical energy industry through the eyes of young people: proceedings of VI Intern. scientific and technical conference, November 9–13, 2015, Ivanovo. T. 2. Ivanovo, 2015. P. 294–297.

5. Metelkov A. A. Development of planning methodology for power supply systems of areas with low density loads, taking into account the uncertainty of the initial information: dis. ... cand. tech. sciences: 05.14.02. M., 2004. 208 p.

6. Semenova L.A. Multi-criteria analysis of the development models of power supply systems in uncertainty conditions// Cherepovets State University Bulletin. 2016. No. 4. P. 39–46.

7. Abdullazyanov E.Y., Vasiliev Y.A., Galiev I.F. Enterprises power supplying schemes reliability models for investments efficiency // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2009. No. 5-6. P. 67–74.

8. Abapour S., Zare K., Mohammadi-ivatloo B. Evaluation of technical risks in distribution network along with distributed generation based on active management // IET Generation, Transmission & Distribution. 2014. Vol. 8. Iss. 4. P. 609–618. doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0666.

9. Cunbin L., Gefu Q., Tingting Y. Operational Risk Assessment of Distribution Network Equipment Based on Rough Set and D-S Evidence Theory // Journal of Applied Mathematics. 2013. Article ID 263905. 7 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/263905>.

10. Yuldasheva A.I., Malafeev A.V. Accounting the reliability index at planning the mode of industrial power supply system with own electric power stations // Electrotechnical Systems and Complexes. 2015. No. 3(28). P. 36–40.

11. Duplyakin V.M. Games theory. Samara: Publishing House of Samara Aerospace University, 2011. 191 p.

12. Koroteev M.V. Linguistic variables of economic indicators // Audit and financial analysis. - 2012. No. 2. 5 p.

13. Kudrin B.I., Zhilin B.V., Oshurkov M.G. Electric power supply. Rostov-on-Don: Phoenix, 2018. 382 p.

14. Nepomnyashchy V.A. Economic losses from a electric power supply failure. M: MPEI, 2010. 187 p.

15. Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Panova E.A., Varganova A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Zinoviev V.V., Savelieva K.S., Iuldasheva A.I., Krubtsova A.A., Kurilova N.A., Testimony 2015662725, Russia, Program “Complex of automated mode analysis KATRAN 9.0”. “Computer Program, Database, TIMS,” 2015.

16. Malafeev A.V. Algorithm of structural reliability calculation of large industrial works electric power supply systems based on sequential reduction method // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2016. No. 4. P. 62–72.

17. RUCABEL.RU [Electronic resource]. Access mode: http://www.rucabel.ru/asu/cabel_asu_400_93.html, free (access date: 10/20/2018).

18. RD 34.20.574. Guidelines for the application of indicators of reliability of elements of power systems and operation of power units with steam-turbine installations [Electronic resource]. Access mode: http://www.xjob.ru/ПД_34.20.574, free (access date: 10/20/2018).

Authors of the publication

Aleksei V. Malafeev – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Alina I. Iuldasheva – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Поступила в редакцию

29 декабря 2018 г.



РАЗВИТИЕ МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ СВИ И ИЗМЕРЕНИЙ SCADA В ЭЭС

П.И. Бартоломей, С.И. Семенов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

sinissem@gmail.com

Резюме: В современных энергосистемах последние 20 лет активно внедряются системы измерений, в которых добавлена высокоточная синхронизированная метка времени, позволяющая получать помимо действующего значения тока линии и напряжения шины их электрические фазные углы. За предыдущие годы сформировалось большое количество методов получения установившегося режима на базе телеметрии (оценивания состояния), которые основаны на учете измерений только модулей этих величин, а также значений активной и реактивной составляющих мощностей инъекций в узлах и перетоков в ветвях. Большая часть этих методов основывалась на методе взвешенных наименьших квадратов или других методах, основанных на методе максимального правдоподобия, для которых требуется определение весовых коэффициентов измерений, традиционно выбираемых на основе относительных погрешностей этих измерений. Однако имеется проблема учета измерений электрических углов, для которых относительная погрешность оказывается принципиально неопределимой. Также существует проблема, связанная с объединением измерений СВИ с традиционными средствами измерений в единую измерительную систему, ввиду существенного различия в точности и частоте обновления. В работе предложен подход для объединения средств СВИ с традиционными средствами измерения SCADA в рамках процедуры оценивания состояния, учитывающий изложенные проблемы.

Ключевые слова: статическое оценивание состояния, синхронизированные векторные измерения (СВИ), метод максимального правдоподобия, выбор весовых коэффициентов, линейное оценивание состояния.

STATE ESTIMATION METHOD DEVELOPMENT FOR SCADA AND SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENTS WITHIN POWER SYSTEM

P.I. Bartolomey, S.I. Semenko

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

Yekaterinburg, Russia

sinissem@gmail.com

Abstract: In modern power systems, the special kind of measurement systems was actively implemented for the last 20 years. These measurement systems have a high-precision synchronized time stamp, which makes it possible to obtain, in addition to the effective value of line current and bus voltage, the electrical phase angles. In previous years, a large number of methods for obtaining a steady state based on telemetry (state estimation) have been formed, which are based on taking measurements of only the modules of these quantities, as well as the

values of the active and reactive components of injection power in the nodes and flows in the branches. Most of these methods were based on the weighted least squares method, or other methods based on the maximum likelihood method, for which determination of the weighting factors of measurements, traditionally chosen on the basis of relative errors of these measurements, is required. However, there is the problem of taking measurements of electrical angles, for which the relative error is fundamentally indeterminable. There is also a problem associated with the integration of measurements of phasor measurements with traditional measurement tools into a single measuring system due to a significant difference in accuracy and update frequency. The paper proposes an approach for combining phasor measurements with traditional SCADA measurements in the framework of the state estimation procedure, taking into account the problems described.

Keywords: static state estimation, synchronized vector measurements, maximum likelihood estimation, choice of weights, linear state estimation.

For citation: Bartolomey P.I., Semenenko S.I. State estimation method development for SCADA and synchronized phasor measurements within power system. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21 (3-4):68-78. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-68-78.

Введение

Классические методы оценивания состояния (ОС) опираются на измерения действующих значений токов и напряжений узлов, измерения активных и реактивных составляющих мощностей узлов и ветвей. Ввиду нелинейности связи тока, напряжения и мощности, задача ОС оказывается нелинейной, что вносит значительные трудности в ее практическую реализацию. Методы решения этой задачи оказываются итерационными, неробастными, недостаточно надежными, потенциально длительными для расчета. Как вывод, актуальными стали вопросы перехода от итерационного решения задачи ОС к прямому. Основным способом такого перехода является избавление от измерений мощности. Развитие и внедрение средств синхронизированных векторных измерений (СВИ) позволили использовать в задаче ОС только измерения комплексных величин токов и напряжений, что обеспечило появление методов комплексного линейного оценивания состояния (ЛОС) [1–3].

Наиболее популярные методы ОС используют весовые коэффициенты измерений, которые выбираются на основе погрешностей средств измерений. Все измерения, входящие в классическое ОС, имеют данные об относительной погрешности. Однако для измерений фазных углов токов и напряжений, которые появились в системе СВИ, невозможно записать относительную погрешность ввиду их природы. Особенно актуально этот вопрос проявляется в задаче указанного комплексного линейного ОС. Следовательно, важным является вопрос о совместном использовании измерений фазных углов и остальных классических измерений.

Существуют энергосистемы [1–3], в которых полная наблюдаемость обеспечивается полностью за счет СВИ. В таких сетях реализуется идея использования комплексных значений токов и напряжений, полученных от измерительных устройств, для выполнения ЛОС. Для российских энергосистем, характеризующихся разветвленностью и большой протяженностью, в настоящее время пока нет возможности реализации идеи ЛОС из-за отсутствия достаточного количества устройств измерительного оборудования *PMU* для обеспечения наблюдаемости. Мало того, сама возможность ЛОС еще не обоснована.

На данный момент СВИ не являются повсеместными ввиду их дороговизны в прошлом, а также инертности перехода к новым технологиям. Соответственно

приходится рассматривать вопросы плавного перехода к совместному использованию СВИ и система сбора и управления данными SCADA, которое требует разработки методов гибридного ОС. Именно этим вопросам и посвящена настоящая работа. К тому же, в данной статье рассматриваются вопросы развития ОС с тем, чтобы при появлении локального участка сети, наблюдаемого по PMU, появлялась возможность использовать ЛОС наиболее эффективно.

Метод максимального правдоподобия в задаче ОС

Несмотря на недавние публикации о неквадратичных методах [4] и развитии расчетных процедур [5], метод взвешенных наименьших квадратов является наиболее используемым методом, применяемым на практике для ОС. Он заключается в минимизации взвешенной суммы квадратов отклонений оцениваемых связанных между собой величин от измерений, что может быть записано в виде [6–7]

$$\Phi_2(X) = \sum_{i=1}^M \alpha_i \cdot (y_i(X) - y_i^{\text{ТИ}})^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\{h_j(X) = 0, \quad j = 1 \dots K,$$

где X – вектор базовых параметров состояния, размерностью N , через которые можно выразить все остальные параметры; M – количество измерений, используемых в задаче ОС; $y_i^{\text{ТИ}}$ – значение телеизмерения (ТИ) параметра; $y_i(X)$ – аналитическое выражение измеряемого параметра через независимые переменные X ; α_i – весовой коэффициент; $\{h_j(x) = 0, \quad j = 1 \dots K$ – ограничения, отражающие заведомо точную информацию. Для наблюдаемости требуется избыточность измерений, или $M > N$, при невырожденности системы $\{y_i(X) = y_i^{\text{ТИ}}, \quad i = 1 \dots M$. Применительно к энергосистеме под X , чаще всего, понимается вектор модулей и фазовых углов напряжений; $y_i^{\text{ТИ}}$ – измерения узловых и линейных значений модулей токов, активных и реактивных составляющих мощностей, модулей узловых напряжений; $y_i(X)$ – аналитическое выражение измеряемого параметра только через модули и фазы напряжений; $\{h_j(x) = 0, \quad j = 1 \dots K$ – ограничения подстанций с нулевым отбором мощности, ограничения на коэффициенты мощности.

От выбора коэффициентов α_i напрямую зависит эффективность процедуры ОС. Коэффициенты α_i выбираются каждый раз, исходя из опыта эксплуатации (эмпирически), экспертом на основании рекомендаций по их выбору (эвристически) [1, 8]. На сегодняшний день эти рекомендации предлагают устанавливать значения α_i обратно пропорционально квадрату относительной погрешности измерения θ_i , которая указана в паспорте измерительного прибора. До недавнего момента эти методы выбора весовых коэффициентов эффективно справлялись с поставленной задачей, предположительно, за счет накапливаемого опыта эксплуатации соответствующих программных комплексов. Мало того, до настоящего времени, погрешности всех приборов для измерения величин энергосистемы метрологически нормируются по относительной погрешности. Появившиеся недавно устройства СВИ, давая возможность измерять фазовый электрический угол комплексных величин, который не может быть нормирован по относительной погрешности, выявили новую проблему по учету этих углов в ОС.

Для того, чтобы обосновать подход к выбору весовых коэффициентов измерений разнородных параметров, рассмотрим метод наименьших квадратов с позиции метода

максимального правдоподобия. Рассмотрим энергосистему, для которой выполняется задача ОС. Пусть, как и в предыдущей задаче, в энергосистеме выполнено M телеизмерений. Поскольку все эти измерения содержат погрешности, предположим, что для всех этих погрешностей заданы плотности вероятности $\rho_i(\Delta y_i)$, где i – номер измерения от 1 до M ; Δy_i – случайная величина ошибки, которая обычно принимается непрерывной. Тогда оказывается, что

$$y_i = y_i^{\text{ТИ}} + \Delta y_i, \quad (2)$$

где y_i – оцениваемое значение измеряемого параметра. Из (1) следует, что

$$\Delta y_i = y_i - y_i^{\text{ТИ}}. \quad (3)$$

Предположим, что все измерения осуществляются независимо друг от друга, то есть погрешности измерений являются независимыми случайными величинами. Тогда, для определения плотности вероятности всей системы измерений $\rho_{\Pi}(\Delta Y)$, плотности вероятности вектора таких величин ΔY перемножаются [9] и, следовательно,

$$\rho_{\Pi}(\Delta Y) = \prod_{i=1}^M \rho_i(\Delta y_i). \quad (4)$$

Эту функцию чаще всего принимают в качестве функции правдоподобия в методе максимального правдоподобия [9].

Также предположим: гарантированно известно, что параметры y_i связаны между собой системой уравнений

$$\left\{ f_j(X, Y) = 0, \quad j = 1 \dots L, \quad (5)$$

где $f_j(X, Y)$ – функции связи, которые определяются информацией о конкретных физических явлениях и объектах; L – число уравнений связи. Следовательно задачу оптимизации для метода максимального правдоподобия можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Phi(Y) = \prod_{i=1}^M \rho_i(y_i - y_i^{\text{ТИ}}) \rightarrow \max \\ \left\{ f_j(X, Y) = 0, \quad j = 1 \dots L. \end{aligned} \quad (6)$$

Решением этой оптимизационной задачи является оценка параметров X .

Если предположить, что все случайные величины Δx_i являются нормально распределенными, т.е. иными словами можно записать

$$\rho_i(\Delta y_i) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_i}} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta y_i^2}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_i^2}\right), \quad (7)$$

где σ_i – дисперсия случайной величины Δy_i , тогда, учитывая что экспоненциальная функция и умножение на положительную константу не влияют на отношение порядка, а также что при произведении степеней показателя степени складываются, можно переписать выражение (5) в форме метода наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} \Phi(Y) = \sum_{i=1}^M \frac{1}{\sigma_i^2} \cdot (y_i - y_i^{\text{ТИ}})^2 \rightarrow \min \\ \left\{ f_j(X, Y) = 0, \quad j = 1 \dots L. \end{aligned} \quad (8)$$

Переход от максимизации (5) к минимизации (7) был осуществлен при помощи смены знака в показателе экспоненты. Задача (8) уже сама по себе является задачей взвешенных

наименьших квадратов. Чтобы окончательно преобразовать выражение (8) к выражению (1), дополнительно требуется предположить, что существует эквивалентное преобразование

$$\{f_j(X, Y) = 0, \quad j = 1 \dots L \Rightarrow \begin{cases} y_j(X) = y_j, & j = 1 \dots M, \\ h_j(X) = 0, & j = 1 \dots K. \end{cases} \quad (9)$$

Из выражений (1)–(8) видно, что метод наименьших квадратов (1) является частным случаем метода максимального правдоподобия. Следовательно, весовые коэффициенты α_i оказываются полностью эквивалентными величине, обратной квадрату величины дисперсии $1 / \sigma_i^2$.

Перечислим допущения, сделанные при переходе от метода максимального правдоподобия к методу наименьших квадратов.

1. Плотность вероятности всех погрешностей заведомо известна, неизменна во времени и является нормальным распределением.
2. Система ограничений в форме равенств в задаче оптимизации должна выполняться при любых условиях, и сомнений в ее правильности быть не должно.
3. Должны быть наперед известными и неизменными дисперсии.
4. Не должно существовать или должна быть заранее известна величина σ_i систематической погрешности измерений.

Все указанные допущения содержатся в методе наименьших квадратов (1), описанном в начале раздела, хотя они приняты там неявным образом.

Выбор весовых коэффициентов для метода взвешенных наименьших квадратов в задаче ОС

Как уже было отмечено, для всех измерений паспортом приборов нормируется относительная погрешность θ_i . Традиционно в методе наименьших квадратов (1) весовые коэффициенты рекомендуется [1,8] выбирать как

$$\alpha_i = \frac{1}{(\theta_i \cdot m_i)^2}, \quad (10)$$

где m_i – масштабирующий коэффициент измерения, который выбирается исходя из физической природы измеряемой величины. Например, для модулей напряжений, модулей токов и составляющих мощностей эти коэффициенты будут отличаться, потому что они являются разнородными. Строго говоря, основная проблема описанной методики заключается в том, что она полностью применима только при условии, что θ_i является не относительной, а абсолютной погрешностью, но обычно она применяется к относительным погрешностям. Эта проблема ранее не проявлялась, так как все измерения были нормированы по относительной погрешности. Однако относительно недавнее появление СВЧ привело к возможности измерять величины, которые принципиально могут нормироваться только по абсолютной погрешности, а именно, фазовые углы электрических величин. Применение старого подхода (9) к новым системам измерений приводит к тому, что накопленный опыт, на базе которого были выбраны масштабирующие коэффициенты m_i , оказывается неприменимым и, как вывод, это может привести к непредсказуемому искажению режима в результате его ОС. Хуже того, в текущей парадигме ОС невозможно даже нормировать это искажение режима, поскольку мера отклонения режима от эталона оказывается неопределенной.

В настоящей работе предлагается заменить традиционный метод выбора весовых коэффициентов, чтобы учесть разнородность параметров, которая, в первую очередь,

проявляется при совместном использовании модулей и фазных углов электрических величин. Суть предлагаемого метода состоит в том, что следует разделить все измерения на M_Θ измерений с нормируемой абсолютной погрешностью Θ_i , $i=1..M_\Theta$, и M_θ измерений с нормируемой относительной погрешностью θ_i , $i=1+M_\Theta..M$. Для измерений с нормируемой абсолютной погрешностью предлагается рассчитывать весовой коэффициент как

$$\alpha_i = \frac{1}{\Theta_i^2}, \quad (11)$$

а для измерений с нормируемой относительной погрешностью как

$$\alpha_i = \frac{1}{(\theta_i \cdot y_i^{\text{ТИ}})^2}. \quad (12)$$

Соответственно, целевая функция и система ограничений примет вид:

$$\Phi(Y) = \sum_{i=1}^M \alpha_i \cdot (y_i - y_i^{\text{ТИ}})^2 \rightarrow \min \quad (13)$$

$$\{f_j(X, Y) = 0, \quad j = 1..L,$$

где α_i – весовой коэффициент, соответствующий (11) для измерений с нормируемой абсолютной погрешностью и (12) для измерений с нормируемой относительной погрешностью.

Покажем, как был выполнен переход от выражения (8), где в качестве весовых коэффициентов используются $1/\sigma_i^2$ к весовым коэффициентам, записанным в выражениях (11)–(12). Для этого примем первую группу допущений: нормируемые абсолютные погрешности соответствуют доверительному интервалу измеряемой величины. Это можно математически записать, как

$$\Theta_i = S_i \cdot \tau_i \approx \sigma_i \cdot \tau'_i, \quad (14)$$

где S_i – выборочное стандартное отклонение, соответствующее серии измерений, предполагаемо проведенных для поверки прибора; τ_i – коэффициент Стьюдента, соответствующий выполненной серии измерений и требуемой надежности измерений (например 99%); τ'_i – коэффициент Стьюдента, соответствующий бесконечному числу измерений и той же надежности, что и для τ_i . Знак равенства в (14) показывает, что измерительные приборы предполагаются поверенными серией испытаний по более точному прибору, а знак примерного равенства – что при такой поверке было сделано бесконечное число испытаний [10]. С учетом того, что в паспортах приборов указывается наибольшая погрешность [10], данные допущения представляются приемлемыми для дальнейших рассуждений.

Второй группой допущений примем: нормируемая относительная погрешность может быть рассчитана как

$$\theta_i = \frac{S_i \cdot \tau_i}{y_i^{\ominus}} \approx \frac{\sigma_i \cdot \tau'_i}{y_i^{\ominus}} \approx \frac{\sigma_i \cdot \tau'_i}{y_i^{\text{ТИ}}}, \quad (15)$$

где y_i^{\ominus} – эталонное значение измеряемого параметра; $y_i^{\text{ТИ}}$ – фактическое значение измерения с погрешностью. Первый знак равенства выражения (15) означает допущение, что измерительные приборы предполагаются поверенными серией испытаний по более точному прибору с нормировкой по эталонным значениям. Следующий знак примерного

равенства показывает предположение, что было выполнено бесконечное число испытаний при проверке. Второй знак примерного равенства отражает предположение, сделанное в данной работе, о том, что эталонное значение приближенно равно телеизмерению.

Преобразование координат для выполнения линейного ОС

При рассмотрении ОС с участием СВИ появилась возможность сформулировать задачу ЛОС. В зарубежных публикациях [1–3] рассматривается следующий подход к ЛОС. Предполагается, что *PMU* обеспечивают получение действительных и мнимых значений токов и напряжений. Положим, что в ветви энергосистемы, связывающей узлы s и t , со стороны узла s установлен *PMU*, который измеряет комплексные значения напряжения узла s и тока ветви $s-t$. В таком случае для этого *PMU* можно записать фрагмент целевой функции и системы ограничений (13):

$$\begin{aligned} \phi_{PMU}(Y) = & \alpha_{U_{sR}} \cdot (y_{U_{sR}} - y_{U_{sR}}^{TH})^2 + \alpha_{U_{sI}} \cdot (y_{U_{sI}} - y_{U_{sI}}^{TH})^2 + \alpha_{I_{sR}} \cdot (y_{I_{sR}} - y_{I_{sR}}^{TH})^2 + \alpha_{I_{sI}} \cdot (y_{I_{sI}} - y_{I_{sI}}^{TH})^2 \\ & \begin{cases} -g_{ss} \cdot U'_s + b_{ss} \cdot U''_s + g_{st} \cdot U'_t - b_{st} \cdot U''_t = I'_{st}, \\ -b_{ss} \cdot U'_s - g_{ss} \cdot U''_s + b_{st} \cdot U'_t + g_{st} \cdot U''_t = I''_{st}, \\ y_{U_{sR}} - U'_s = 0, \quad y_{U_{sI}} - U''_s = 0, \\ y_{I_{sR}} - I'_{st} = 0, \quad y_{I_{sI}} - I''_{st} = 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

где U'_s и U''_s – действительная и мнимая составляющие напряжения узла s ; U'_t и U''_t – действительная и мнимая составляющие напряжения узла t ; I'_{st} и I''_{st} – действительная и мнимая составляющие тока, втекающего в узел s из ветви $s-t$; g_{ss} и b_{ss} – действительная и мнимая составляющие собственной проводимости ветви $s-t$ в узле s ; g_{st} и b_{st} – действительная и мнимая составляющие собственной проводимости ветви $s-t$ в узле t ; $\alpha_{U_{sR}}$, $\alpha_{U_{sI}}$, $\alpha_{I_{sR}}$ и $\alpha_{I_{sI}}$ – весовые коэффициенты измерений, соответственно, действительных и мнимых составляющих напряжений и токов.

Серьезным преимуществом такого подхода является возможность переформулировать систему (16) в терминах классической постановки задачи метода наименьших квадратов (1). Если в рассматриваемой энергосистеме имеется полная наблюдаемость при помощи только *PMU*, то такой подход приводит к решению систем линейных уравнений, что делает саму задачу ОС решаемой быстро, робастно и без применения итерационных методов.

Однако не менее серьезным недостатком такого подхода является неизвестность весовых коэффициентов измерений. С точки зрения указанного выше подхода метода максимального правдоподобия (13), такой способ формулирования целевой функции и системы ограничений оказывается некорректным ввиду того, что для СВИ указываются не погрешности действительной и мнимой составляющих векторных измерений, но задаются относительные погрешности их модуля и абсолютные погрешности их угла.

Запишем фрагмент целевой функции и системы ограничений (16) для случая, когда измерениями являются модули и углы комплексных параметров:

$$\begin{aligned} \phi_{PMU}(Y) = & \alpha_V \cdot (y_V - y_V^{TH})^2 + \alpha_{\delta_s} \cdot (y_{\delta_s} - y_{\delta_s}^{TH})^2 + \alpha_I \cdot (y_I - y_I^{TH})^2 + \alpha_{\psi} \cdot (y_{\psi} - y_{\psi}^{TH})^2 \\ & \begin{cases} -g_{ss} \cdot V_s \cdot \cos(\delta_s) + b_{ss} \cdot V_s \cdot \sin(\delta_s) + g_{st} \cdot V_t \cdot \cos(\delta_t) - b_{st} \cdot V_t \cdot \sin(\delta_t) = I_{st} \cdot \cos(\psi_{st}), \\ -b_{ss} \cdot V_s \cdot \cos(\delta_s) - g_{ss} \cdot V_s \cdot \sin(\delta_s) + b_{st} \cdot V_t \cdot \cos(\delta_t) + g_{st} \cdot V_t \cdot \sin(\delta_t) = I_{st} \cdot \sin(\psi_{st}), \\ y_V - V_s = 0, \quad y_{\delta_s} - \delta_s = 0, \\ y_I - I_{st} = 0, \quad y_{\psi} - \psi_{st} = 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

где V_s и δ_s – модуль и угол напряжения узла s ; V_t и δ_t – модуль и угол напряжения узла t ; I_{st} и ψ_{st} – модуль и угол тока, втекающего в узел s из ветви $s-t$; α_V , α_{δ_s} , α_I

и α_ψ – весовые коэффициенты для модуля напряжения, угла напряжения, модуля тока и угла тока как комплексной величины.

Подход (17) описанный в работе [1], несмотря на корректность записи, обладает важным недостатком по сравнению с подходом (16) – он предполагает итерационное решение системы нелинейных уравнений, вне зависимости от того, какого типа измерения (SCADA или СВИ) используются.

Для того, чтобы совместить линейность подхода (16) и статистическую корректность подхода (17), предлагается формулировка задачи, представленная в (18). Важно отметить, что в формулировке (18) сделано допущение, не являющееся грубым, а именно: предполагается, что отклонение измерений модулей и углов комплексных величин от их эталонных значений оказывались малыми величинами. Это позволило выполнить поворот системы координат действительной и мнимой компонент комплексных параметров таким образом, чтобы действительные компоненты u'_s и i'_{st} соответствовали значениям измерений модуля, а мнимые компоненты u''_s и i''_{st} соответствовали значениям измерений угла, помноженного на измерение модуля.

$$\begin{aligned} \phi_{PMU}(Y) = & \alpha_v \cdot (y_v - y_v^{TH})^2 + \alpha_\delta \cdot (y_\delta - y_\delta^{TH})^2 + \alpha_l \cdot (y_l - y_l^{TH})^2 + \alpha_\psi \cdot (y_\psi - y_\psi^{TH})^2 \\ & \left\{ \begin{array}{l} -g_{ss} \cdot U'_s + b_{ss} \cdot U''_s + g_{st} \cdot U'_t - b_{st} \cdot U''_t = I'_{st}, \\ -b_{ss} \cdot U'_s - g_{ss} \cdot U''_s + b_{st} \cdot U'_t + g_{st} \cdot U''_t = I''_{st}, \\ y_v - u'_s = 0, \quad y_\delta - \frac{1}{y_v^{TH}} \cdot u''_s = 0, \\ u'_s = U'_s \cdot \cos(y_\delta^{TH}) - U''_s \cdot \sin(y_\delta^{TH}), \\ u''_s = U'_s \cdot \sin(y_\delta^{TH}) + U''_s \cdot \cos(y_\delta^{TH}), \\ y_l - i'_{st} = 0, \quad y_\psi - \frac{1}{y_l^{TH}} \cdot i''_{st} = 0, \\ i'_{st} = I'_{st} \cdot \cos(y_\psi^{TH}) - I''_{st} \cdot \sin(y_\psi^{TH}), \\ i''_{st} = I'_{st} \cdot \sin(y_\psi^{TH}) + I''_{st} \cdot \cos(y_\psi^{TH}). \end{array} \right. \end{aligned} \quad (18)$$

Формулировка (18) совместно с подходом метода максимального правдоподобия позволяет выполнить оценку состояния при условии, что сеть наблюдаема с точки зрения СВИ следующим образом:

$$diag(Y^{TH})^{-1} \cdot A \cdot X = D, \quad (19)$$

где Y^{TH} – вектор телеизмерений; A – информационная матрица; X – вектор параметров состояния; D – вектор, элементы которого – единицы.

Суть метода, указанного в (19), состоит в комплексном оценивании состояния, когда уравнениям в качестве весового коэффициента даются комплексные значения самих измерений. Это дает основание назвать его как «линейный метод оценивания состояния, взвешенный по измерениям» (*Measurements Weighted Linear State Estimation*), который сокращенно будем называть «MWLSE».

В работе [11] показан метод ОС, в котором предполагается, что для каждой группы измерений организуется своя процедура оценивания: линейная – для измерений СВИ и нелинейная – для SCADA. Сначала выполняется линейное ОС на более точных измерениях СВИ – это и будет первым уровнем ОС. Вторым выполняется нелинейное ОС с фиксацией результатов ОС первого уровня в качестве констант. Тестовые расчеты, проведенные для данного метода, показали, что двухуровневое ОС приводит к существенному увеличению вычислительной скорости при высокой точности

полученного потокораспределения.

Предложенный метод *MWLSE* позволяет более точно выполнять линейное ОС, необходимое для двухуровневого ОС. Благодаря указанному в (19) выбору весовых коэффициентов, линейное ОС, выполняемое для данных от СВИ, становится более точным, что является критичным для выполнения второго уровня нелинейного ОС по данным *SCADA*.

Вычислительный эксперимент

Рассмотрим электрическую сеть, показанную на рис. 1, где в разделе *а)* изображен эталонный режим токораспределения, *б)* – эталонный режим с указанием потокораспределения, *в)* – пример измерений с погрешностями. Предполагается, что в узлах 1 и 3 установлены *PMU*, измеряющие напряжения в этих узлах и токи в линиях 1-2 и 2-3 со стороны *PMU*.

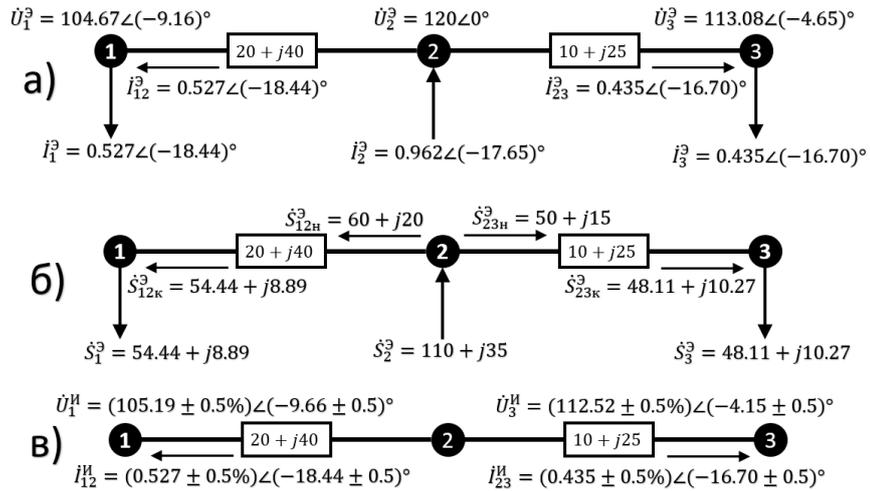


Рис. 1. Пример электрической сети 110 кВ для сопоставления ОС

Для этой сети и для этого состава измерений выполним линейную ОС двумя методами. Первый метод предполагает формулирование целевой функции согласно подходу (16). В связи с тем, что выбор используемых в (16) весовых коэффициентов в литературе не представлен, в рассматриваемом примере были выбраны коэффициенты так, как это было описано в работе [1], где этот метод назван «линейная оценка состояния» (*Linear State Estimation – LSE*). Результат такого ОС показан на рис. 2, где получившиеся токораспределения *а)* и потокораспределения *б)* помечены верхним индексом «*LSE*». В рамке указан результат сопоставления расчетного режима по ОС с эталонным режимом в соответствии с критерием

$$S = \sum_{i=1}^L \left(\left(|\dot{S}_{in}^{LSE} - \dot{S}_{in}^{\text{э}}| \right)^2 + \left(|\dot{S}_{ik}^{LSE} - \dot{S}_{ik}^{\text{э}}| \right)^2 \right), \quad (20)$$

где L – число линий, а индексы «н» и «к» относятся к началу и концу линии.

Указанный критерий (20) является отражением меры отклонения оцененного режима от эталона по мощностям линий, который в наибольшей степени учитывает погрешность расчета режима при выборе управляющих воздействий, связанных с изменением потокораспределения. В результате расчета первым методом значение данного критерия оказалось равным 53,095.

В качестве второго метода рассматривался предлагаемый метод *MWLSE* (19), который был протестирован на той же схеме и тех же измерениях с целью сопоставления

с первым методом. Результат расчета показан на рис. 3, где также токораспределения *a)* и потокораспределения *б)*, в свою очередь, отмечены верхним индексом «ЛОС». Для этого метода значение критерия (20) оказалось равным 0,826, что почти на 2 порядка меньше, чем у первого метода.

Как видно из сопоставления двух конечных результатов ОС двумя методами, можно уверенно судить о намного более высокой точности метода *MWLSE*.

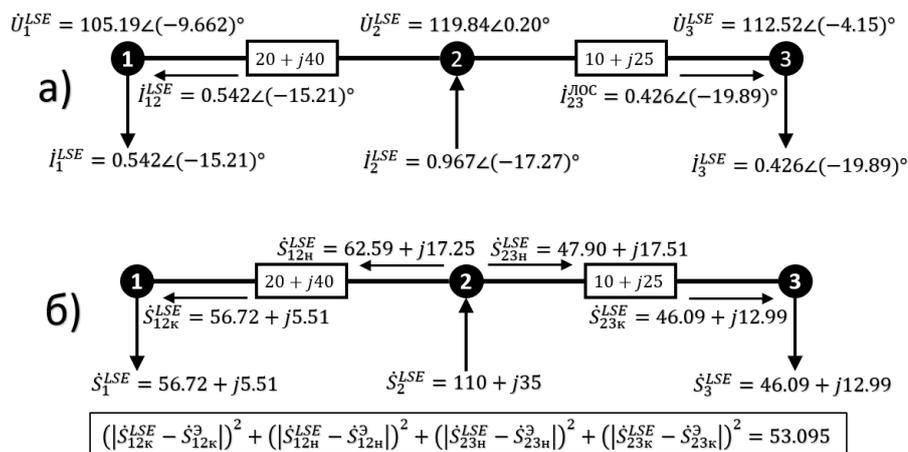


Рис. 2. Результат ОС для измерений, изображенных на рис. 1, *а)* по первому методу

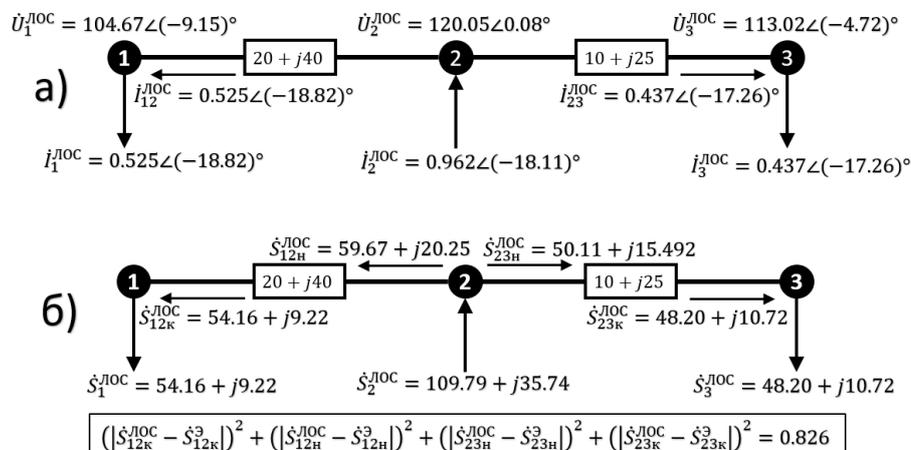


Рис. 3. Результат ОС для измерений, изображенных на рис 1 по методу *MWLSE*

Для убедительности метод протестирован на ряде тестовых задач *IEEE*, а именно для сетей *IEEE-14*, *IEEE-RTS96*, *IEEE-30*, *IEEE-57*, *IEEE-118*. Результаты испытаний показали более высокую точность *MWLSE*, причем, было выявлено следующее. Во-первых, оказалось, что точность предложенного метода тем выше, в сравнении с методом *LSE*, чем выше класс напряжения рассматриваемой сети. Во-вторых, было замечено, что сравнительная точность предложенного метода снижалась при утяжелении режима, но все равно оставалась выше, чем у других методов.

Заключение

Как известно, в ЭЭС для оценки состояния по телеметрии *SCADA* наибольшее применение находит метод взвешенных наименьших квадратов. Появившиеся в последние годы системы СВИ позволили перейти к ускоренной линейной оценке

состояния *LSE*. Однако этот метод не гарантирует высокой точности конечного результата.

Предложенный в данной работе метод оценивания состояния, названный *MWLSE*, предназначен для сетей, наблюдаемых при помощи *PMU* в системе информационного обеспечения *WAMS*. Он является таким же робастным и вычислительно быстрым, как и метод линейного оценивания состояния *LSE*, используемый в зарубежных энергосистемах, но оказался намного более точным во всех рассмотренных случаях.

Литература

1. D.A. Haughton, G.T. Heydt, "A Linear State Estimation Formulation for Smart Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Systems. May 2013. Vol. 28. no. 2. P. 1187–1195.
2. L. Zhang, A. Bose, A. Jampala, V. Madani, J. Giri, "Design, Testing, and Implementation of a Linear State Estimator in a Real Power System," in IEEE Transactions on Smart Grid. July 2017. Vol. 8, no. 4. P. 1782–1789.
3. S.G. Ghiocel et al. "Phasor-Measurement-Based State Estimation for Synchrophasor Data Quality Improvement and Power Transfer Interface Monitoring," in IEEE Transactions on Power Systems. March 2014. Vol. 29, no. 2. P. 881–888.
4. Хохлов М.В. Робастное оценивание состояния электроэнергетических систем на основе неквадратичных критериев: дис. ... канд. техн. наук. Сыктывкар, 2010. С. 132.
5. Максименко Д.М., Машалов Е.В., Неуймин В.Г. Оценивание состояния на базе оптимизационного алгоритма в ПК RastrWin3 // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2013. №2(69). С. 36–44.
6. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976.
7. Schweppe F.C., Wildes J. Power system static state estimation. Part 1: exact model. // IEEE Trans. On Power Systems. 1970. №1. P.120–125.
8. Прихно В.Л., Черненко П.А. Оперативный расчет режима энергосистемы по данным телеизмерений. Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1982. С.70–75.
9. Никулин М.С. Отношения правдоподобия критерий // Математическая энциклопедия / Виноградов И. М. (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1984. Т. 4. С.151–1216.
10. ГОСТ Р 8.000-2015. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения.
11. P.I. Bartolomey and S.I. Semenenko. "Power Systems State Estimation Acceleration on the Basis of the Synchronized Phasor Measurements in the Power System Steady State Control Tasks," 2018 // International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA). Moscow, 2018. P. 1–10.

Авторы публикации

Бартоломей Петр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматизированные электрические системы» Уральского Федерального Университета (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

Семенов Сергей Игоревич – старший преподаватель кафедры «Автоматизированные электрические системы» Уральского Федерального Университета (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

References

1. D. A. Haughton and G. T. Heydt, "A Linear State Estimation Formulation for Smart Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1187-1195, May 2013.

2.L. Zhang, A. Bose, A. Jampala, V. Madani and J. Giri, "Design, Testing, and Implementation of a Linear State Estimator in a Real Power System," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 4, pp. 1782-1789, July 2017.

3.S. G. Ghiocel et al., "Phasor-Measurement-Based State Estimation for Synchrophasor Data Quality Improvement and Power Transfer Interface Monitoring," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, no. 2, pp. 881-888, March 2014.

4.Khokhlov M. V, Robust assessment of state of electric power systems based on non-quadratic criteria // Dissertation candidate. tech. sciences. - Syktyvkar, 2010. - P. 132.

5.Maksimenco D.M., Mashalov E.V., Neumin V.G. State estimation based on optimization algorithm using RastrWin3 software // Izvestiya NTC Edinoy energeticheskoy sistemy, №2 (69), 2013. - p. 36-44.

6.Gamm A.Z. Statistical methods for assessing the state of electric power systems // Moscow: Nauka, 1976.

7.Schwepe F.C., Wildes J. Power system static state estimation. Part 1: exact model. // IEEE Trans. On Power Systems, №1, 1970. - P.120-125.

8.Prikhno V.L., Chernenko P.A. Operational calculation of power system mode according to the telemetry data // Irkutsk: SEI SB AS USSR, 1982. - P. 70-75.

9.Nikulin M.S. Likelihood Relations Criterion // Mathematical Encyclopedia / Vinogradov I.M. (Ch. Ed.). - Moscow.: Soviet Encyclopedia, 1984. - Vol. 4. - p. 151. - 1216 p.

10. Russian State Standard GOST R 8.000-2015 State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). The main provisions.

11. P. I. Bartolomey and S. I. Semenenko, "Power Systems State Estimation Acceleration on the Basis of the Synchronized Phasor Measurements in the Power System Steady State Control Tasks," 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA), Moscow, 2018, pp. 1-10.

Authors of the publication

Petr I. Bartolomey – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Sergey S. Semenenko – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Поступила в редакцию

09 января 2019 г.



УДК 621.311

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОТУРБИННЫХ МИНИ-ТЭС, РАБОТАЮЩИХ НА УГЛЕ

Д.Т. Нгуен., Фам Д.Н., Г.Р. Мингалеева

Казанский государственный энергетический университет, г.Казань, Россия
mingaleeva-gr@mail.ru

Резюме: В работе представлены результаты расчетов основных блоков паротурбинных мини-ТЭС малой мощности: 6, 11,4, 12, 20 и 25 МВт, предназначенных для работы в автономном режиме. На основе материальных, тепловых и эксергетических балансов определены показатели эффективности – эксергетический КПД и удельные затраты топлива. Наибольший эксергетический КПД на уровне 33% имеют блоки 6, 20 и 25 МВт, что свидетельствует о возможности эффективного совмещения котельного и турбинного оборудования данной мощности, а также комплектования технологических схем мини-ТЭС на основе выпускаемого сушильно-мельничного оборудования, паровых котлов и турбин малой мощности.

Ключевые слова: мини-ТЭС, подготовка топлива, паровые котлы, паровые турбины.

Благодарности: Работа, по результатам которой написана статья, выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00295 «А».

ASSESSMENT OF INDICATORS OF EFFICIENCY OF THE STEAM-TURBINE MINI-THERMAL POWER PLANTS BURNING COAL

D.T. Nguyen, D.N. Fam, G.R. Mingaleeva

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
mingaleeva-gr@mail.ru

Abstract: In work results of calculations of main units of steam-turbine mini-thermal power plants of low power: 6, 11,4, 12, 20 and 25 MW intended for work in the autonomous mode are presented. On the basis of material, thermal and the exergy balances efficiency indicators – the exergy efficiency and specific expenses of fuel are defined. With a greatest exergy efficiency at the level of 33% have MW blocks 6, 20 and 25 that testifies to a possibility of effective combination of the boiler and turbine equipment of this power and also completing of technological schemes of mini-thermal power plant on the basis of the released drying and mill equipment, boilers and turbines of low power.

Keywords: mini-thermal power plant, fuel preparation, boilers, steam turbines

Acknowledgments: Work by results of which article is executed is executed with financial support of the RFBR within the scientific project No. 17-08-00295 "A".

For citation: Nguyen D.T., Fam D.N., Mingaleeva G.R. Assessment of indicators of efficiency of the steam-turbine mini-thermal power plants burning coal. *Proceedings of the higher educational*

institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2019; 21(3-4):79-89. (In Russ). DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-79-89.

Введение

Согласно экспертным оценкам доля энергетических затрат в себестоимости продукции различных отраслей промышленности составляет от 3 до 55 %, что в основном превышает мировой уровень по соответствующим отраслям. Наиболее высокая доля затрат на топливо и энергию наблюдается в нефтеперерабатывающей промышленности – до 54,7 %. Кроме того, динамика роста тарифов на тепловую и электрическую энергию превышает темпы роста цен на продукцию, что способствует увеличению доли затрат на энергетические ресурсы [1]. Строительство собственного источника для производства электрической и тепловой энергии – малой тепловой электростанции (мини-ТЭС) – позволит добиться стабилизации затрат по данной статье расходов.

Мини-ТЭС могут использоваться в труднодоступных и малоосвоенных регионах, которые удалены от централизованного энергоснабжения (примерно 50–70 % территории России), для обеспечения собственных нужд определенных объектов – жилых или промышленных, а также при наступлении чрезвычайных ситуаций.

Актуальность развития малой распределенной энергетики связана также с экономическим подъемом в зонах централизованного электроснабжения и, соответственно, с затруднениями в оперативном подключении или с отсутствием технологических возможностей присоединения к электрическим сетям.

Топливо-энергетический баланс России в настоящее время существенно сдвинут в сторону использования природного газа, доля которого при производстве тепловой и электрической энергии превышает 70 %. Наряду с известными и неоспоримыми преимуществами данного вида топлива по сравнению с другими, такое положение создает реальную угрозу энергетической безопасности страны [2]. Основным видом топлива для европейской части России и уральских регионов, где проживает более 82 % населения, является природный газ. При этом известно, что поставляемое топливо добывается преимущественно в одном газодобывающем районе Тюменской области и транспортируется на расстояние более 2 тыс. км. Существующая газотранспортная система имеет сложную и разветвленную структуру и «узкие» места, случайное или намеренное повреждение которых может нанести колоссальный ущерб экономике страны. Кроме того, сама газотранспортная система, основа которой была сформирована еще в период существования Советского Союза, существенно изношена [3]. Отмечено, что более 70 тыс. км (42 % от общей протяженности) магистральных газопроводов находится в эксплуатации более 30 лет и требует реконструкции. Аналогичное положение сложилось и с компрессорными станциями.

В таких условиях вводимые в эксплуатацию новые энергетические объекты должны быть максимально диверсифицированы по виду используемого топлива, а объекты малой распределенной энергетики ориентироваться на местное, более дешевое топливо, чтобы быть конкурентоспособными по себестоимости производимой энергии. В пользу развития малой распределенной генерации свидетельствует и тот факт, что в настоящее время, несмотря на реформы в энергетической отрасли, конкуренция остается крайне слабой и потребитель, даже достаточно крупный, не имеет выбора поставщика тепловой и электрической энергии. Имеющиеся аналитические оценки подтверждают, что стоимость централизованного энергоснабжения сравнивается с ценой собственной генерации [4]. При этом распределенные источники энергоснабжения уже могут составлять значительную конкуренцию на энергетическом рынке и способствовать установлению более низких цен.

В настоящее время в России доля малой автономной энергетики оценивается примерно в 5–7 %, в основном это дизельные электростанции единичной мощностью

340 кВт и суммарной – 17 млн. кВт, вырабатывающих до 50 млрд. кВт ч и потребляющих около 17 млн. т у.т. в год [5].

Мировой опыт свидетельствует о том, что доля малой автономной энергетики при выработке электрической энергии может быть, как минимум, в 2 раза выше, как в промышленно развитых странах, где данное направление поддерживается законодательно. В Великобритании, например, владельцам экологически «чистых» мини-электростанций возвращается часть налогов, в Германии существуют льготы и компенсации для владельцев энергетических установок, а централизованные сети принимают у них излишки энергии по выгодным тарифам. Владельцы автономных энергоисточников также освобождаются от налогов в некоторых штатах США, им еще компенсируется часть капитальных расходов [6, 7]. Таким образом, во многих странах, правительства которых заинтересованы в развитии здоровой конкуренции на энергетическом рынке, развитие малой автономной энергетики обеспечивается законодательными и организационными мерами.

На федеральном уровне в перспективе до 2030 года планируется значительное увеличение доли угля и других видов твердого топлива при производстве тепловой и электрической энергии, поскольку разведанные запасы его огромны и составляют 193,3 млрд. тонн (из них бурый уголь – 101,2, каменный уголь – 85,3 и антрациты – 6,8 млрд. тонн), что обеспечивает российскую экономику данным видом топлива на 550 лет [8].

На сегодняшний момент уже существуют реально действующие мини-ТЭС и, хотя они проектируются и строятся под конкретные условия работы, можно выделить некоторые типовые схемы и классифицировать их по основному оборудованию: паровые котлы с паровыми турбинами, газотурбинные установки с котлами-утилизаторами и дизель-генераторы [5]. Твердое топливо (уголь, торф, промышленные углеродсодержащие отходы) в данных схемах может сжигаться в топках паровых котлов или перерабатываться в энергетический газ, который затем сжигается в топках газовых котлов или камерах сгорания ГТУ. Оборудование для термической переработки твердого топлива – газогенераторы и пиролизеры – пока не выпускаются серийно. Поэтому внедрение технологий малой распределенной автономной генерации, использующей уголь и другие виды твердого органического топлива, целесообразно начать с традиционных для российской энергетики схем с паротурбинными установками.

Основная часть

Рассмотрим технологическую схему паротурбинной мини-ТЭС, показанную на рис. 1 [9].

Топливо (Кузнецкий тощий уголь) в пылевидном состоянии поступает в горелки парового котла, который оборудован двухступенчатым пароперегревателем, который предназначен для подготовки пара с требуемыми параметрами для паровой турбины. В опускном газоходе котла установлены в рассечку по две ступени экономайзера и воздухоподогревателя. Кроме того, для регулирования температуры пара перед второй ступенью установлен поверхностный пароохладитель, куда поступает питательная вода после первой ступени экономайзера. Питательная вода и конденсат подогреваются в подогревателях низкого (ПНД) и высокого (ПВД) давления. Сетевая вода нагревается паром из отбора турбины в основном бойлере. В пиковом режиме для нагрева сетевой воды используется острый пар из редуционно-охладительной установки (РОУ).

Алгоритм расчета данной схемы предполагает последовательность действий, показанную на рис. 2.

В качестве топлива используется Кузнецкий уголь марки Т. На первом этапе подбирается паровая турбина, соответствующая требуемой мощности, которая определяется с учетом резервирования агрегатов. По расходу и параметрам пара, который необходимо подавать на турбину, выбирается паровой котел, работающий на твердом топливе. Качественные характеристики используемого в качестве топлива угля определяют

тип и состав системы пылеприготовления. Расчет данного блока является наиболее трудоемким, поэтому в данной статье приводится подробно. Основные показатели эффективности рассчитываются на основе положений эксергетического анализа, который позволяет сравнить объекты, имеющие многоцелевое назначение, например производящие тепловую и электрическую энергию, а также побочные продукты [10, 11].

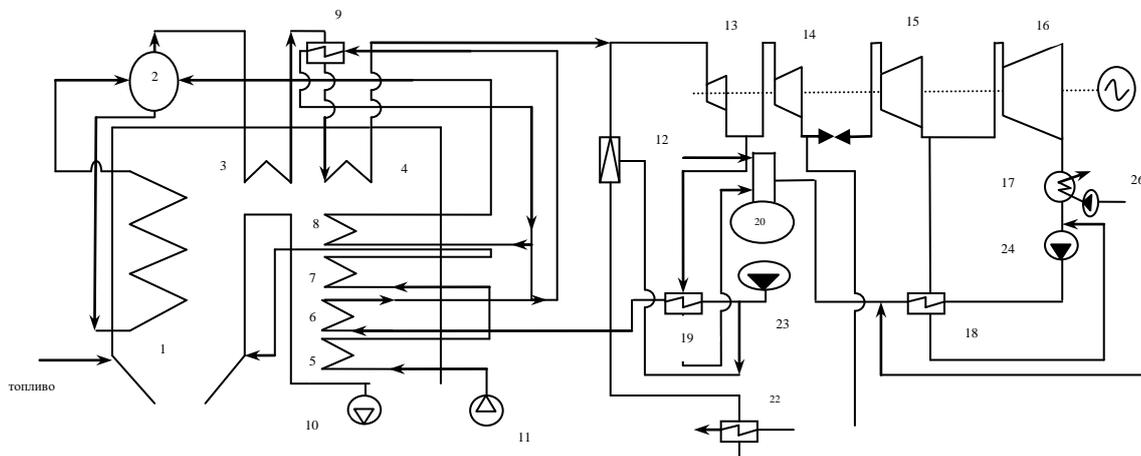


Рис. 1. Технологическая схема паротурбинной мини-ТЭС: 1 – топка; 2 – барабан котла; 3, 4 – первая и вторая ступени пароперегревателя соответственно; 5, 7 – первая и вторая ступени воздухоподогревателя; 6, 8 – первая и вторая ступени водяного экономайзера; 9 – охладитель пара; 10 – дымосос; 11 – дутьевой вентилятор; 12 – РОУ; 13, 14, 15, 16 – отсеки турбины; 17 – конденсатор турбины; 18 – ПНД; 19 – ПВД; 20 – деаэрактор; 21 – сетевой подогреватель; 22 – пиковый подогреватель; 23 – питательный насос; 24, 25 – конденсатные насосы; 26 – циркуляционный насос; 27 – сетевой насос

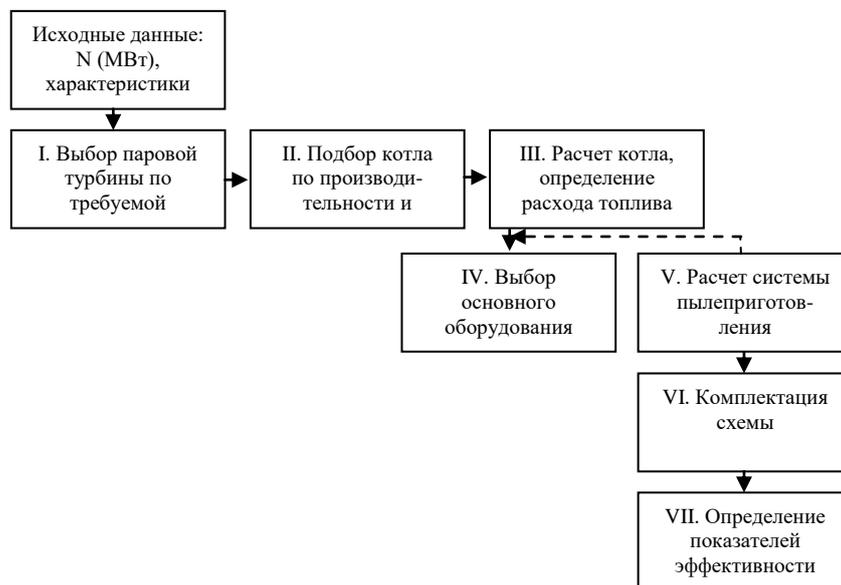


Рис. 2. Алгоритм расчета технологической схемы паротурбинной мини-ТЭС

Паровая турбина подбиралась по требуемой мощности и во взаимосвязи с параметрами пара, получаемого в паровом котле. Существующая номенклатура паровых турбин малой мощности (до 25 МВт) не отличается значительным разнообразием. Данные турбины производятся Калужским турбинным заводом.

Расчет парового котла при сжигании Кузнецкого угля марки Т проводился в соответствии с нормативным методом [12].

Для сушки и пылеприготовления угля из типовых схем выбрана наиболее компактная замкнутая индивидуальная система с прямым вдуванием угольной пыли в топку котла и сушкой воздухом, работающая под давлением. Для данной системы определялся расход сушильного агента – воздуха. В подобных системах могут использоваться углеразмольные мельницы трех типов: шаровые барабанные (ШБМ), молотковые (ММ) и среднеходные валковые (МВС). Для мини-ТЭС из существующего типоразмерного ряда подходят только шаровые барабанные и молотковые мельницы.

Тепловой баланс системы данного типа записывается следующим образом (все составляющие указаны в кДж на 1 кг сырого топлива):

$$q_1 + q_{\text{мех}} - q_{\text{исп}} - q_2 - q_{\text{тл}} - q_5 = 0. \quad (1)$$

где q_1 , q_2 – теплота сушильного агента на входе в мельницу и на выходе из нее соответственно; $q_{\text{мех}}$ – теплота, выделяющаяся в результате работы мелющих органов мельницы; $q_{\text{исп}}$ – теплота, затраченная на испарение влаги топлива; $q_{\text{тл}}$ – физическая теплота топлива; q_5 – потери теплоты в окружающую среду через стенки оборудования.

Поскольку система работает под давлением, составляющая, связанная с присосами наружного воздуха в систему, не учитывается. Расчет составляющих теплового баланса производится следующим образом.

Сначала задается температура сушильного агента на входе в мельницу. При подсушке топлива горячим воздухом верхний предел начальной температуры сушильного агента определяется на 10 °С ниже температуры воздуха за воздухоподогревателем на основе данных [13].

Затем определяется количество теплоты, выделившейся в результате работы мелющих органов мельницы, $q_{\text{мех}}$. При расчете $q_{\text{мех}}$ определяются затраты энергии на размол. При этом учитывается тип мельницы. Если в системе подготовки данного типа установлена ШБМ, то удельный расход электроэнергии на размол, кВт ч/т, определяется по формуле

$$\mathcal{E}_p = \frac{N_c + N_{\text{доп}}}{B}, \quad (2)$$

где N_c – мощность, потребляемая электродвигателем из сети, кВт, равна:

$$N_c = \frac{N_{\text{в.л.}}}{\eta_{\text{эл}}}, \quad (3)$$

$\eta_{\text{эл}}$ – КПД электродвигателя, лежащий в пределах 0,92–0,94; $N_{\text{доп}}$ – дополнительная мощность, расходуемая на охлаждение и возбуждение двигателя, на привод маслонасосов и некоторые другие нужды, кВт (при применении синхронных двигателей $N_{\text{доп}} \approx 50$ кВт, при быстроходных асинхронных двигателях $N_{\text{доп}} \approx 15$ кВт).

В формуле (2) B – размольная производительность мельницы, определяемая по формуле

$$B = K_c K_{\text{всн}} a \varphi^{0,8} \psi \frac{0,6}{6} V_6, \quad (4)$$

где $K_c = K_{бр}K_{эк}$ – коэффициент, представляющий собой произведение следующих величин: $K_{бр}$ – коэффициент формы брони, равный 1,0 для неизношенной волнистой брони; $K_{эк}$ – коэффициент, учитывающий снижение производительности мельницы при эксплуатации (принимается равным 0,9); $K_{вен}$ – коэффициент, учитывающий влияние вентиляции барабана на производительность мельницы, его значение определяется с помощью графиков, построенных по результатам промышленной эксплуатации систем [14]; a – вспомогательная величина, зависящая от свойств топлива и полученной пыли; $\psi_б$ – степень заполнения барабана шарами; $V_б$ – внутренний объем барабана мельницы. Все составляющие в формуле (4) определяются по зависимостям, представленным в работе [14].

При определении коэффициента вентиляции $K_{вен}$ для вентилируемых ШБМ оптимальный расход сушильного агента через мельницу по условиям размола рассчитывается, м³/ч, по следующей зависимости:

$$V_{МВопт} = \frac{0,9V_б}{\varphi} (1000\sqrt[3]{K_{ло}} + 36R_{90}\sqrt{K_{ло}}\sqrt[3]{\psi_б}). \quad (5)$$

где φ – безразмерная величина, характеризующая частоту вращения барабана [14]; $K_{ло}$ – коэффициент размолоспособности; R_{90} – доля частиц, оставшихся на сите с размером ячеек 90 мкм.

Мельничный вентилятор по производительности подбирается таким образом, чтобы ее значения были близки к $V_{МВопт}$, т.е. $K_{вен} \approx 1,0$.

В формуле (3) мощность, потребляемая на вращение барабана, МВт, приведенная к валу электродвигателя, рассчитывается по соотношению

$$N_{в.д} = \frac{1}{\eta_{п}} (0,122D_б^3 L_б n_б \rho_{шн} \psi_б^{0,9} K_{бр} K_{тл} + 1,86D_б L_б n_б S_б), \quad (6)$$

где $\eta_{п}$ – КПД привода без учета КПД электродвигателя (для мельниц с зубчатым приводом и редуктором $\eta_{п} = 0,865$, для мельниц с фрикционным приводом и редуктором, а также для зубчатого привода без редуктора $\eta_{п} = 0,885$, для мельниц с фрикционным приводом без редуктора $\eta_{п} = 0,905$); $\rho_{шн} = 4,9$ т/м³ – насыпная плотность шаров; $K_{тл}$ – коэффициент, учитывающий свойства размалываемого топлива, можно определить по справочным данным [14] в зависимости от вида топлива и степени заполнения барабана шарами; $L_б$ – внутренняя длина барабана, м; $n_б$ – частота вращения барабана, об/мин; $S_б$ – толщина стенки барабана, включая броню (по средней линии волн), м.

При определении затрат теплоты на нагрев топлива $q_{тл}$ температура за мельницей t_2 определяется по справочным данным в зависимости от критерия взрываемости топлива K_T [14].

При установке в системе молотковой мельницы (ММ) затраты энергии на размол топлива определяются по формуле

$$\Xi = \frac{N}{B} = \frac{N_i N_{x.x}}{B}, \quad (7)$$

где относительная мощность N_i определяется по формуле

$$N_i = N_{i0} k_{аб} k_{кон}, \quad (8)$$

в которой N_{i_0} – относительная мощность, зависит от окружной скорости ротора и типа сепаратора, выбирается по справочным данным [14, 16] (допускается отклонение величины N_{i_0} от значений, определенных по графику, в пределах $\pm 15\%$); $k_{аб}$, $k_{кон}$ – эксплуатационные коэффициенты [14].

В формуле (7) $N_{х.х}$ – мощность холостого хода, кВт, определяется по формуле

$$N_{х.х} = 7 \cdot 10^{-5} u^3 D L \beta c_{\sigma} \sqrt{m_D}; \quad (9)$$

здесь D – диаметр ротора; c_{σ} – коэффициент, учитывающий влияние конструкции размольной камеры (для мельниц с открытой размольной камерой $c_{\sigma}=1$, для мельниц с закрытой размольной камерой при угле закрытия ротора не менее 260° $c_{\sigma}=0,6$); L – длина ротора, м; m_D – количество бил по окружности, шт; β – коэффициент, учитывающий относительную высоту била:

$$\beta = 1 - 0,7 \left(1 - \frac{2h}{D} \right)^4, \quad (10)$$

где h – полная высота била, включая проушины, м.

Производительность молотковых мельниц с центробежными и инерционными сепараторами определяется по формуле [14], т/ч:

$$B = c \cdot 10^{-5} u^3 L m_D^{0,25} (1,43 N_i - 1)^{0,7} P_T P_B K_{эк} K_{зак}, \quad (11)$$

где B – производительность, т/ч; c – коэффициент, учитывающий влияние конструкции сепаратора на работу мельницы (для мельниц с инерционным сепаратором $c=1,5$, для мельниц с центробежным сепаратором $c=1,4$); u – окружная скорость ротора, м/с; L – длина ротора, м; m_D – количество бил по окружности, шт.; N_i – относительная мощность мельницы; P_T – коэффициент, учитывающий влияние физических свойств топлива и крупности пыли на производительность мельницы; P_B – коэффициент, учитывающий влияние вентиляции на производительность мельницы; $K_{эк}$ – коэффициент, учитывающий снижение производительности мельниц в эксплуатационных условиях вследствие износа бил (обычно принимают $K_{эк}=0,85$); $K_{зак}$ – коэффициент, учитывающий влияние степени закрытия ротора (для мельниц с открытым ротором $K_{зак}=1$, для мельниц с закрытым ротором $K_{зак}=0,7$).

При тепловом расчете пылеприготовительных установок учитывается только взаимосвязь между влажностью пыли, температурой сушильного агента в конце установки и начальной влажностью топлива. Такая связь выявляется отдельно для условий сушки топлива смесью топочных газов с воздухом и для сушки топлива горячим воздухом. При проведении теплового расчета пылесистемы влажность пыли принимается согласно условиям сжигания в котле, а температура в конце установки выбирается по графикам [14].

После проведения теплового расчета принятое значение t_2 должно согласовываться с относительной влажностью сушильного агента, покидающего установку. Во всех случаях температура агента t_2 должна быть выше температуры точки росы водяных паров. Если принятая температура t_2 не удовлетворяет указанным условиям, то тепловой расчет повторяется, увеличивается количество сушильного агента или уменьшается его начальная температура.

При известных температурах на входе в установку и на выходе из нее по справочным данным определяются значения теплоемкости сухого воздуха (на входе) и влажного (на выходе) [14, 16].

Проводится предварительный расчет расхода сушильного агента на входе в установку. Затем рассчитывается влагосодержание сушильного агента на выходе из установки, отнесенное к 1 кг сухого газа. Определяется весовое и объемное количество влажного сушильного агента в конце установки при сушке горячим воздухом.

После проведенных расчетов необходимо проверить полученное значение сушильной производительности мельницы, т/ч, по формуле

$$B_c = \frac{V_2}{1000V_{\text{вл.см}}}, \quad (12)$$

где $V_{\text{вл.см}}$ – количество влажного воздуха, м³/кг; V_2 – количество влажного сушильного агента в конце установки, м³/ч, вычисляется в зависимости от расчетной производительности мельницы B_p :

$$V_2 = 1000V_{\text{вл.см}}B_p. \quad (13)$$

Сушильная производительность должна быть выше или равна расчетной, т. е. $B_c \geq B_p$. В случае, если располагаемое V_2 (например, производительность мельничного вентилятора или мельницы-вентилятора) меньше полученного по формуле (13), то необходимо увеличить принятое раньше значение или повысить температуру сушильного агента t_1 . При отсутствии этой возможности производительность установки будет ограничена условиями сушки.

Производительность мельничного вентилятора, $V_{\text{МВ}}$, м³/ч, установленного перед мельницей, работающей под давлением, определяется по формуле:

$$V_{\text{МВ}} = \frac{1000g_1B_p}{\rho_{0в}} \cdot \frac{273+t}{273}, \quad (14)$$

где t – температура воздуха перед вентилятором, °С; g_1 – расход воздуха на входе в установку, кг/кг сырого угля; $\rho_{0в}$ – плотность воздуха, кг/м³.

Расчетная производительность для выбора мельничного вентилятора принимается с запасом в 5%. По техническим характеристикам выбранного вентилятора определяется создаваемый им напор в системе.

На основе полученных расчетных данных по энергетическим и материальным потокам, входящим в каждый элемент установки и выходящим из него, определялась их эксергия, эксергетическая эффективность отдельных блоков и всей технологической схемы.

Эксергетический метод является наиболее общим способом термодинамического исследования различных процессов преобразования энергии. Он позволяет наглядно определить степень совершенства и источники потерь в установках и найти пути их совершенствования.

Данный метод достаточно широко представлен в работах, связанных с исследованием систем, работающих по принципу комбинированной выработки тепловой и электрической энергии [10, 11], однако к объектам малой энергетики, работающих на твердом топливе, применяется крайне редко.

Важнейшие составляющие эксергии – физическая и химическая, в сумме они дают термическую эксергию E_t . Физическая эксергия E – это та часть эксергии, которая является результатом несовпадения температуры и давления рассматриваемого вещества с температурой и давлением окружающей среды. Эксергия, возникающая из-за разницы составов, представляет собой химическую эксергию E_x . Химическая эксергия угля может быть определена различными способами [17]. В рассматриваемой работе удельная химическая эксергия каменного угля e_x , кДж/кг, определяется по соотношению, предложенному Степановым В.С. [18]:

$$e_x = \left[1,009 + \frac{0,131O + 0,116W}{100 - (A + W)} \right] Q_H^P, \quad (15)$$

где O – содержание кислорода в угле на пересчете на рабочую массу, %; W и A – влажность и зольность угля в пересчете на рабочую массу, %; Q_H^P – низшая теплотворная способность угля, кДж/кг.

Основным процессом в системах пылеприготовления является сушка, совмещенная с измельчением в углеразмельняющих мельницах. Все составляющие эксергетического баланса процесса сушки и измельчения могут быть определены по известным зависимостям (Дж/с или Вт) [5], эксергетический коэффициент полезного действия $\eta_{с.м}$ – по формуле:

$$\eta_{с.м} = \frac{E''_y + E''_{исп} + E''_{с.а}}{E'_{с.а} + \sum_{i=1}^n L_i + E'_y + E_{мех}}, \quad (16)$$

где L_i – электрическая мощность, затрачиваемая на оборудование для сушки и измельчения; n – количество аппаратов, имеющих электрический привод; $E''_{исп}$ – эксергия, затрачиваемая на испарение влаги из угля; $E'_{с.а}$, $E''_{с.а}$ – эксергия сушильного агента на входе и на выходе из мельницы, E'_y , E''_y – эксергия угля, поступающего в мельницу, и измельченного угля, $E_{мех}$ – эксергия теплоты, выделяющейся при измельчении угля.

Эксергетическая эффективность парового котла вычисляется по соотношению:

$$\eta_{п.к} = \frac{E''_п}{E'_{п.с} + E''_{п.в}}, \quad (17)$$

$E'_{п.в}$ – эксергия питательной воды, поступающей в котел-утилизатор; $E''_п$ – эксергия пара, образующегося в котле-утилизаторе; $E'_{п.с}$ – эксергия продуктов сгорания, поступающих в котел-утилизатор.

Эксергетический КПД паровой турбины определяется следующим образом:

$$\eta_{п.т} = \frac{N_{э} + E''_{п.т}}{E''_п + \sum_{i=1}^m L_i}, \quad (18)$$

где $N_{э}$ – электрическая мощность, вырабатываемая электрогенератором паровой турбины; $E''_{п.т}$ – эксергия пара, направляемого на теплофикацию; $E''_п$ – эксергия пара, поступающего на паровую турбину от котла-утилизатора; L_i – электрическая мощность, затрачиваемая на вспомогательное оборудование; m – количество единиц вспомогательного оборудования паровой турбины, имеющего электрический привод.

Для более полной оценки эффективности мини-ТЭС, работающей на твердом топливе и производящей тепловую и электрическую энергию, используется эксергетический КПД паротурбинной мини-ТЭС, в который не входят внутренние потоки паротурбинной установки:

$$\eta_{мини-ТЭС} = \frac{N_{э} + E''_{п.т}}{E'_y + \sum_{i=1}^k L_i + E'_в + E'_{п.в} + E_{мех}}, \quad (19)$$

где k – общее количество единиц вспомогательного оборудования мини-ТЭС, имеющего электрический привод. Остальные обозначения в формуле (19) такие же, как в формулах (16)–(18).

Результаты и обсуждение

Подбор оборудования осуществлялся на основе известных методик расчета и проектирования систем подготовки топлива, котельных установок и паровых турбин, марки выбранных котлов, паровых турбин и мельниц представлены в табл. 1. Анализ представленных результатов показывает, что эффективность котлов-утилизаторов различной мощности в диапазоне паропроизводительности от 25 до 90 т/ч находится примерно на уровне 48% за исключением котла КЕ 25-14-225С, имеющего меньшие показатели. Эксергетические КПД паровых турбин малой мощности существенно различаются. Наибольшее значение соответствует турбине П-6-1.2/0.5 мощностью 6 МВт. Турбины мощностью 11 и 12 МВт обладают меньшей эксергетической эффективностью – 44,5 и 46,9 % соответственно. Также низкое значение КПД у углеразмольных мельниц ММТ 1300/2300/735 и ШБМ 250/390, которые выбраны для мини ТЭС мощностью 12 и 20 МВт соответственно.

В качестве показателей эффективности рассмотрен эксергетический КПД мини-ТЭС и удельный расход угля, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 1

Основное оборудование для паротурбинной мини-ТЭС

№	Электрическая мощность мини-ТЭС, МВт	Марка котла-утилизатора	Эксергетический КПД котла $\eta_{п.к.}$, %	Марка паровой турбины	Эксергетический КПД турбины $\eta_{п.т.}$, %	Марка углеразмольной мельницы	Эксергетический КПД сушильно-мельничной установки, $\eta_{с.м.}$, %
1	6	КЕ 25-14-225С	42,1	П-6-1.2/0.5	79,7	ММТ 1000/710/980	27,88
2	11,4	Е 65-3.9-440 КТ	48,2	К 11-1. (КТЗ)	44,5	ШБМ 220/330	27,07
3	12	КЕ 65-3.9-440 КТ	48,2	К 12-4.2	46,9	ММТ 1300/2300/735	24,74
4	20	Е 75-3.9-440 КТ	48,3	ПТГ-20	67,5	ШБМ 250/390	24,26
5	25	Е 90-3.9-440 КТ	47,7	ПТГ-30	70,4	ММТ 1300/2030/735	28,68

Таблица 2

Показатели эффективности мини-ТЭС

№	Электрическая мощность мини-ТЭС, МВт	Расход угля, кг/с	Эксергетический КПД мини-ТЭС, %	Удельный расход угля, г/МВт
1	6	0,757	33,6	126
2	11,4	2,25	21,3	197
3	12	2,246	22,4	187
4	20	2,6	32,3	130
5	25	3,112	33,7	124

Заключение и выводы

Наибольший эксергетический КПД на уровне 33 % имеют блоки 6, 20 и 25 МВт, что свидетельствует о возможности эффективного совмещения котельного и турбинного оборудования данной мощности, а также комплектования технологических схем мини-ТЭС

на основе соответствующих сушильно-мельничных установок, паровых котлов и турбин малой мощности.

Литература

1. Иванов В.А. Анализ энергозатрат в различных отраслях промышленности // Наукоедение. 2015. Т.7, №1. С.1–18. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/144TVN115.pdf> (Дата обращения 01.03.2018).
2. Сендеров С.М., Рабчук В.И., Еделев А.В. Особенности формирования перечня критически важных объектов газотранспортной сети России с учетом требований энергетической безопасности и возможные меры минимизации негативных последствий от чрезвычайных ситуаций на таких объектах // Известия академии наук. Энергетика. 2016. №1. С.70–78.
3. Сухарев М.Г., Кулик В.С. Влияние недостоверности информации при планировании режимов систем газоснабжения и принятии решений по их развитию // Известия академии наук. Энергетика. 2015. №4. С.69–83.
4. Веселов Ф.В., Соляник А.И. Состояние и перспективы инвестиционной деятельности в постреформенной электроэнергетике // Известия академии наук. Энергетика. 2015. №1. С.105–83.
5. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Моделирование технологических схем мини-ТЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 220 с.
6. Котлер В.Р. Мини-ТЭС: зарубежный опыт // Теплоэнергетика. 2006. № 8. С. 69–71.
7. Ghioca L., Panait L., Pressel S., Prutu G. Conditii tehnice si economice de rentabilizare a unor centrale termice si de termoficare, mici, din cadutul RENEL // Energetica. A. 1993. Vol. 41. No 5. P. 214–223.
8. Энергетическая стратегия России на период до 2030. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 03.11.2017).
9. Клер А.М., Маринченко А.Ю., Сушко С.Н. Оптимизация паротурбинного энергоблока угольной мини-ТЭС с учетом переменных графиков тепловых и электрических нагрузок // Теплофизика и аэромеханика. 2006. №2. С. 303–314.
10. Gao L., Jin H., Liu Z. Exergy analysis of coal-based polygeneration system for power and chemical production // Energy. 2004. Vol. 29. P. 2359–2371.
11. Ghosh S., De S. Energy analysis of a cogeneration plant using coal gasification and solid oxide fuel cell // Energy. 2006. 31. P. 345–363.
12. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / коллектив авторов; под ред. Н.В. Кузнецова и др. М. : ЭКОЛИТ, 2011.
13. Липов Ю.М. и др. Компоновка и тепловой расчет парового котла: учеб.пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988.
14. Назмеев Ю.Г., Мингалеева Г.Р. Системы топливоподачи и пылеприготовления ТЭС: Справочное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2005.
15. РД 153-34.1-03.352-99. Правила взрывобезопасности топливоподачи и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива. М.: РАО «ЕЭС России», 1999.
16. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов. М.-Л.: ЦКТИ, 1971.
17. Eisermann W. Johnson, Conger P. W.L. (1980) Estimating Thermodynamic Properties of Coal, Char, Tar and Ash. Fuel Process. Technol., 3, 39–53.
18. Степанов В.С. Химическая энергия и эксергия веществ. Новосибирск: Наука, 1990. 163 с.

Авторы публикации

Нгуен Дык Тоан – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Фам Данг Ням – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Мингалева Гюзель Рашидовна – д-р техн. наук, зав. кафедрой «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Ivanov V. A. The analysis of energy consumption in various industries//Science of science, 2015. Т.7, No. 1. Page 1–18. [Electronic resource]. Access mode: URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/144TVN115.pdf> (Date of the address 3/1/2018).
2. Senderov S.M., Rabchuk V.I., Edelev A.V. Features of formation of the list of critical objects of the russian gas pipeline network from the viewpoint of energy security and ways to minimize negative consequences of emergency situations at such objects // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2016. No. 1. Page 70–78.
3. Sukharev M.G., Kulik V.S. Influence of information uncertainty on decisions in the region of managing and development of the gas supply system // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2015. No. 4. Page 69–83.
4. Veselov F.V., Solyanik A.I. Current state and a prospect of the investment activity in the russian power sector after the reform // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. – 2015, No. 1. Page 105–83.
5. Afanasyeva O.V., Mingaleeva G. R. Modeling of technological schemes of mini-thermal power plant. M.: MEI publishing house, 2014. 220 pages.
6. Kotler V.R. of Mini-combined heat and power plant: foreign experience// Теплоэнергетика. 2006. No. 8. Page 69–71.
7. Ghioca L., Panait L., Pressel S., Prutu G. Conditie tehnice si economice de rentabilizare a unor centrale termice si de termoficare, mici, din cadutul RENEL // Energetica. A. 1993. Vol. 41. No 5. P. 214–223.
8. Energy strategy of Russia until 2030. It is approved by the order of the Government of the Russian Federation of November 13, 2009 No. 1715-r. [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (date of the address 03.11.2017).
9. Claire A.M., Marinchenko A.Yu., Sushko S.N. Optimization of the steam-turbine power unit of coal mini-combined heat and power plant taking into account variable schedules of thermal and electric loadings//Thermophysics and aeromechanics. 2006. No. 2. Page 303–314.
10. Gao L., Jin H., Liu Z. Exergy analysis of coal-based polygeneration system for power and chemical production // Energy. 2004. Vol. 29. P. 2359–2371.
11. Ghosh S., De S. Energy analysis of a cogeneration plant using coal gasification and solid oxide fuel cell // Energy. 2006. 31. P. 345–363.
12. Thermal calculation of boiler units. Standard method / collective of authors; under the editorship of N.V. Kuznetsov, etc. M.: EKOLIT, 2011.
13. Lipov Yu.M., etc. Configuration and thermal calculation of the boiler: studies. a grant for higher education institutions. M.: Energoatomizdat, 1988.
14. Nazmeev Yu.G., Mingaleeva G. R. Systems of fuel feeding and pyleprigotovleniye of thermal power plant: Handbook. M.: MEI publishing house, 2005.
15. RD 153-34.1-03.352-99. Explosion safety rules of fuel feeding and installations for preparation and combustion of dust-like fuel. M.: RAO UES of Russia, 1999.
16. Calculation and design of pyleprigotovitelny installations of boiler units. M.-L.: TsKTI, 1971.
17. Eisermann W. Johnson, Conger P. W.L. (1980) Estimating Thermodynamic Properties of Coal, Char,Tar and Ash. Fuel Process. Technol., 3, 39–53.
18. Stepanov V.S The chemical energy and exergy of substances. Novosibirsk: Nauka. 1990. 163 pages.

Authors of the publication

Nguyen Dyk Tuoang – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

© Д.Т. Нгуен., Фам Д.Н., Г.Р. Мингалеева

Fam Dang Nyat – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Guzel R. Mingaleeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Поступила в редакцию

31 января 2019 г.



МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ТРЕХФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В СИСТЕМЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.И. Федотов, Р.Э. Абдуллазянов, Р.М. Мударисов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Ramil.mударисов@litsey7.com

Резюме: В статье показаны основные выводы, полученные при исследовании устойчивости синхронных двигателей при кратковременных нарушениях электроснабжения, обусловленных трехфазными короткими замыканиями в системах внешнего электроснабжения. Анализ работ, выполненных по данной тематике, выявил следующие их недостатки: не учитывается закон изменения напряжения на шинах двигателя, обусловленный возникшим замыканием; не учитывается зависимость напряжения на шинах двигателя от распределения токов в элементах системы электроснабжения; не учитывается воздействие нарушения на двигатель через его систему возбуждения. В рамках работы рассмотрены короткие замыкания в смежных линиях и выявлен закон изменения напряжения на шинах распределительного устройства подстанции во время замыкания. Для учета влияния указанных пренебрежений (недостатков) на устойчивость двигателя составлена модель синхронного двигателя и показаны условия ее применения. На основе проведенных исследований с использованием разработанной модели обоснованы методики оценки устойчивости синхронных двигателей при трехфазных коротких замыканиях в системах внешнего электроснабжения. Результаты исследования могут быть использованы для настройки устройств релейной защиты систем электроснабжения с синхронными двигателями.

Ключевые слова: кратковременное нарушение электроснабжения, короткое замыкание, устойчивость, синхронный двигатель, допустимая длительность нарушения, методика.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы», соглашение о предоставлении гранта в форме субсидии № 075-02-2018-190 – 1 этап, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57418X0188.

SYNCHRONOUS MOTORS STABILITY ESTIMATION METHODOLOGIES UNDER THREE-PHASE FAULTS IN POWER SUPPLY GRIDS

A.I. Fedotov, R.E. Abdullazyanov, R.M. Mudarisov

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

Ramil.mударисов@litsey7.com

Abstract: This article presents the three phase short circuit impact on synchronous motors stability research results. The analysis of the researches done in this field shows that they neglect

following features in motor operation: the voltage sag form occurred during short circuit; dependency of voltage on the motor busbars from the currents passing in the power supply grid elements; the impact of sag through excitation system. Research conducts the voltage sag form equation for the three phase short circuits occurring in the adjacent electric lines. Synchronous motor model was developed to account the impact of neglected factors on the motor stability. Finally, article proposes the methodology developed to assess synchronous motor stability under three-phase short circuit faults occurring in power grids. Research results could be used to calibrate protective relays used in power supply grids with powerful synchronous motors.

Keywords: *Short-break power supply; short circuit; stability; synchronous motor; critical fault duration; methodology.*

Acknowledgments: *This research was funded by Ministry of Education and Science of Russian Federation as a part of federal targeted programme “Research and Development in Priority Areas of Development of the Russian Scientific and Technological Complex for 2014-2020”. Grant subsidy) agreement № 075-02-2018-190 – 1 stage, unique ID of applied scientific research (project) RFMEFI57418X0188.*

For citation: Fedotov A.I., Abdullazyanov R.E., Mudarisov R.M. Synchronous motors stability estimation methodologies under three-phase faults in power supply grids. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):90-99. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-90-99.

Обеспечение устойчивой работы приводов при кратковременных нарушениях электроснабжения (КНЭ) является одной из ключевых задач в системах электроснабжения с синхронными двигателями (СД). Данная задача решается внедрением и правильной настройкой уставок устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР) и релейной защиты линий электропередач (ЛЭП), которые обеспечивают восстановление нормального электроснабжения до потери двигателями синхронизма [1, 2].

В обоих случаях требуется обоснование технических критериев (методик) оценки допустимой длительности КНЭ, под которой понимается наибольшая длительность КНЭ при которой двигатели еще сохраняют свою устойчивость.

Существующие практические критерии и методы оценки устойчивости [3, 4], а также отдельные исследования, которые проводятся в области оценки допустимой (критической) длительности нарушения двигателя при КЗ, основываются на оценке устойчивости двигателя со следующими допущениями (недостатками): при полном отключении питания и последующем его восстановлении [1, 2, 5]; без учета переходной составляющей остаточного напряжения [6–9]; без учета зависимости напряжения на шинах двигателя от распределения токов по элементам системы электроснабжения [7, 10]; без учета влияния КНЭ на двигатель через его систему возбуждения [6–9, 11].

В действительности, одной из главных причин КНЭ являются короткие замыкания (КЗ), возникающие в смежных ЛЭП [12]. При этом все вышесказанные допущения влияют на определении достоверной длительности нарушения питания, так как после возникновения замыкания двигатель непродолжительное время работает в условиях провала напряжения с переходной составляющей, к тому же напряжение на шинах СД зависит от падения напряжения в сопротивлениях элементов системы электроснабжения. Заметим, что большая часть мощных СД оборудована статическими системами возбуждения (СВ), которые получают питания от шин промышленной подстанции, откуда следует, что КНЭ влияет на устойчивость двигателя и через его систему возбуждения.

На рис. 1 приведена принципиальная схема электроснабжения СД. Где: ИП – источник питания (система); Л11 и Л12 – участки питающей линии; Т1 – понижающий трансформатор промышленной подстанции с СД; Л2 – смежная линия; РУ-1 распределительное устройство подстанции энергосистемы; РУ-2 – распределительное устройство промышленной подстанции.

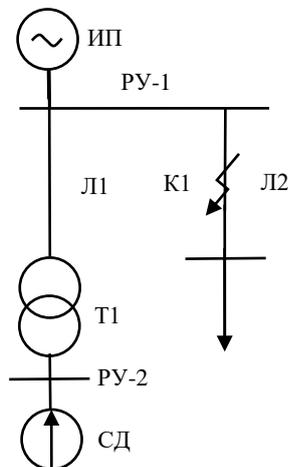


Рис. 1. Принципиальная схема электроснабжения СД

Рассмотрим трехфазное КЗ в смежной ЛЭП (точка К1 на рис. 1) для схемы электроснабжения, в которой состав высоковольтной двигательной нагрузки (СД на рис. 1) не превышает 25–30% мощности трансформатора ввода (Т1 на рис. 1). Согласно ГОСТ Р 52735-2007 «Короткие замыкания в электроустановках» при расчете начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ допускается не учитывать синхронные электродвигатели, если они отделены от точки КЗ силовыми трансформаторами. Поэтому при трехфазном замыкании, возникающем в смежной ЛЭП (точка К1 на рис. 1), мгновенные значения периодической составляющей тока подпитки КЗ и напряжения одной из фаз на шинах РУ-1 подстанции энергосистемы соответственно имеют вид:

$$i_{\Pi}(t) = \frac{E\sqrt{2}\sin(\omega t + \alpha - \varphi_K)}{\sqrt{3}\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}} = \sqrt{2}I_{\Pi}\sin(\omega t + \alpha - \varphi_K); \quad (1)$$

$$u_{\Pi}(t) = \frac{E\sqrt{2}\sqrt{(R_2^2 + X_2^2)}\sin(\omega t + \alpha - \varphi_1)}{\sqrt{3}\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}} = \sqrt{2}U_{\Pi}\sin(\omega t + \alpha - \varphi_1). \quad (2)$$

Апериодические составляющие тока и напряжения на шинах РУ-1, возникающие при КЗ, определим по выражениям:

$$i_A(t) = Ae^{-t/T}, \quad (3)$$

$$u_A(t) = (R_2 i_A(t) + \frac{X_2}{\omega} \frac{di_A(t)}{dt}) = (R_2 - \frac{X_2}{\omega T}) Ae^{-t/T}. \quad (4)$$

В выражениях (1–4): R_1 , X_1 и R_2 , X_2 – активные и реактивные сопротивления источника питания (энергосистемы) и участка аварийной ЛЭП соответственно; E – ЭДС энергосистемы; T – постоянная затухания аperiodической составляющей; ω – циклическая частота напряжения системы; α – фаза включения КЗ; φ_1 и φ_K – фазовые углы, определяемые параметрами схемы замещения; A – модуль начального значения

апериодической составляющей тока КЗ. Величину A определим как разность мгновенных значений тока в момент, предшествующий КЗ, и периодической составляющей тока в начальный момент КЗ:

$$A = I_M \sin(\alpha - \varphi) - \sqrt{2} I_{\Pi} \sin(\alpha - \varphi_K). \quad (5)$$

В выражении (5): I_M – амплитуда периодической составляющей тока до КЗ; φ – фазовый угол периодической составляющей тока до КЗ. Из выражения (5) следует, что апериодическая составляющая тока и напряжения достигают своего наибольшего значения, если в предшествующем КЗ режиме на смежной линии отсутствует нагрузка. Перепишем выражение для апериодической составляющей напряжения на шинах РУ-1 (4) с учетом выражения (5):

$$u_A(t) = -\left(R_2 - \frac{X_2}{\omega T}\right) (\sqrt{2} I_{\Pi} \sin(\alpha - \varphi_K)) e^{-t/T} = -U_A e^{-t/T}. \quad (6)$$

Тогда остаточное напряжение на шинах РУ-1 при КЗ в смежной линии будет иметь вид выражения, содержащего периодическую (U_{Π}) и апериодическую составляющие (U_A):

$$U_{\text{ост}}(t) = \sqrt{2} U_{\Pi} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_1) - U_A e^{-t/T}. \quad (7)$$

На рис. 2, 3 и в табл. 1 показаны зависимости начальной величины апериодической составляющей остаточного напряжения (U_{A*}), фазовых углов φ_1 и φ_K , соответственно, от периодической составляющей остаточного напряжения ($U_{\Pi*}$) для шести значений постоянной времени затухания $T^*=(1, 2, 3, 4, 5 \text{ и } 10)$ о.е. Данные результаты получены для сетей напряжением 110–220 кВ с токами трехфазного КЗ на шинах районной подстанции 4–40 кА. Из зависимостей рис. 2, 3 следует, что для рассматриваемых классов систем электроснабжения апериодическая составляющая напряжения тем больше, чем глубже провал напряжения и чем меньше постоянная времени затухания.

Таблица 1

Зависимости фазового угла φ_K от постоянной затухания T^*						
T^* , о.е.	1	2	3	4	5	10
φ_K , °	81	85	87	88	88	89

Для оценки устойчивости синхронного двигателя составлена его численная модель, показанная на рис. 4. Отличием составленной модели от аналогичных моделей является то, что она учитывает особенности работы двигателя в условиях трехфазных КЗ, возникающих в смежных ЛЭП: закон изменения напряжения при КЗ согласно выражению (7), зависимость напряжения на шинах СД от распределения токов в элементах системы внешнего электроснабжения и воздействие КНЭ на двигатель через его СВ.

Для учета воздействия КНЭ на двигатель через его систему возбуждения в модель (рис. 4) включены элементы типовой системы возбуждения ТЕ8-320 (*Excitation System*), реализующие ее основные функции и режимы работы в условиях КНЭ, а именно: форсировку возбуждения при понижении напряжения, включение цепи пускового сопротивления для ограничения перенапряжения на выпрямителе и пропуск зажигания тиристоров для отключения цепи пускового сопротивления.

Оценим условия применения практических критериев и упрощенных моделей СД, применяемых для оценки устойчивости СД при КНЭ, обусловленных трехфазными КЗ, на примере двигателя СТД-8000 со следующими характеристиками рабочего режима: приведенный момент инерции механизма $J_{\text{МЕХ}}=250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, коэффициент загрузки $m_c=0,7$ о.е., рабочее напряжение системы до КЗ $U=0,997$ о.е. (на шинах СД $U_{\text{СД}}=1,081$ о.е.),

синхронная ЭДС до КЗ $E_d=1,598$ о.е., угол нагрузки $\delta=62,8^\circ$. Двигатель получает питание от системы 110 кВ ($Z_1=j15,88$ Ом) через трансформатор ТДН-16000/110, подключенный непосредственно к шинам подстанции энергосистемы.

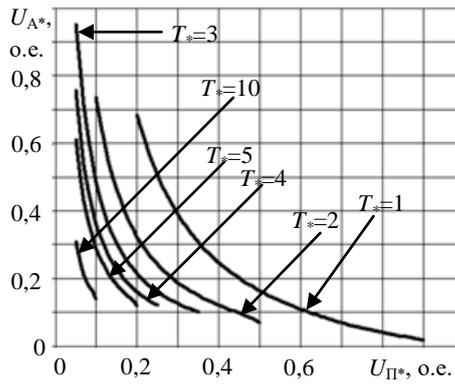


Рис. 2. Зависимости аperiodической составляющей (U_{A*}) от периодической составляющей ($U_{П*}$)

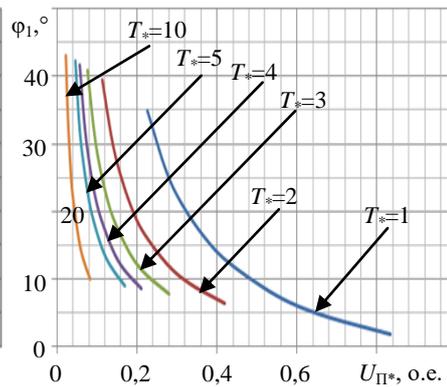


Рис. 3. Зависимости угла ϕ_1 от напряжения $U_{П*}$ при учете аperiodической составляющей U_{A*}

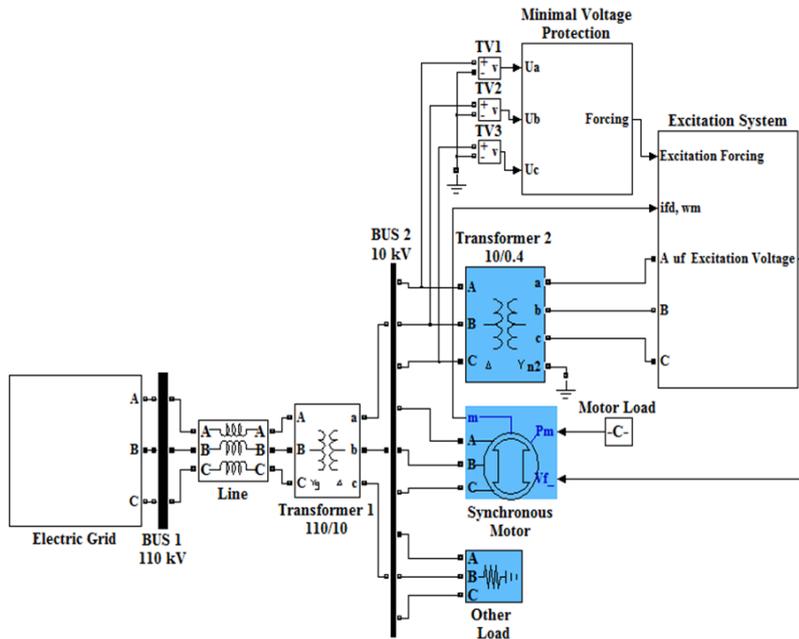


Рис.4. Блок - схема модели СД и его системы электроснабжения

В табл. 2 приведены результаты исследования допустимой длительности КНЭ, обусловленного трехфазными КЗ в смежных линиях, полученные на упрощенных моделях.

В табл. 2:

- 1) тестовая модель, которая является полной моделью системы электроснабжения, показанной на рис. 1 и учитывающей систему ИП, питающую линию Л1, понижающий трансформатор Т1, двигатель СД, систему возбуждения двигателя, смежную линию Л2 и блок трехфазного КЗ в смежной линии;
- 2) модель 1 – разработанная модель, которая вместо системы и блока трехфазного замыкания в смежной линии учитывает закон изменения остаточного напряжения на шинах РУ-1 согласно выражению (7), но при этом учитывает остальные элементы системы электроснабжения (Л1, Т1, двигатель, СВ);
- 3) модель 2 аналогична модели 1, но не учитывает апериодическую составляющую остаточного напряжения;
- 4) модель 3 не учитывает апериодическую составляющую остаточного напряжения и воздействия КНЭ на СВ;
- 5) модель 4 не учитывает апериодическую составляющую остаточного напряжения, воздействия КНЭ на СВ, а также элементы системы электроснабжения, соответственно и влияния распределения токов в ней на напряжение СД.

Таблица 2

Оценка устойчивости на численных моделях												
№	Вид численной модели	Параметры остаточного напряжения ($U_{П*}$, $U_{А*}$, T^* , о.е.)		Опыт 1: $U_{П*}=0$, $U_{А*}=0$, $T^*=0$ (КЗ на шинах РУ-1 энергосистемы)		Опыт 2: $U_{П*}=0,11$, $U_{А*}=0,256$, $T^*=5$ ($U=110$ кВ, КЗ на ЛЭП АС-240 $L=4,678$ км)		Опыт 3: $U_{П*}=0,227$, $U_{А*}=0,579$, $T^*=1$ ($U=110$ кВ, КЗ на ЛЭП АС-70 $L=7,077$ км)		Опыт 4: $U_{П*}=0,431$, $U_{А*}=0,217$, $T^*=1$ ($U=110$ кВ, КЗ на ЛЭП АС-185 $L=26,276$ км)		Суммарная погрешность по всем проверкам Δ_c , %
		t_d , мс	Δ , %	t_d , мс	Δ , %	t_d , мс	Δ , %	t_d , мс	Δ , %			
1	Тестовая модель	160	0,0	211	0,0	231	0,0	831	0,0	0,0		
2	Модель 1	172	7,5	215	1,9	232	0,4	932	12,2	22,0		
3	Модель 2	172	7,5	206	2,4	217	6,1	698	16,0	31,9		
4	Модель 3	178	11,3	210	0,5	223	3,5	933	12,3	27,5		
5	Модель 4	245	53,1	314	48,8	124 9	440, 7	393 4	373, 4	916, 0		

Результаты показывают, что достоверная оценка устойчивости СД во всем диапазоне провалов напряжения возможна только в полной модели (тестовая модель в табл. 2), а также в моделях, которые учитывают: закономерность изменения остаточного напряжения; зависимость напряжения на шинах СД от распределения токов в элементах системы электроснабжения и воздействия КНЭ на двигатель через СВ (модель 1 в табл. 2). Однако разработанная модель обладает рядом преимуществ, а именно: позволяет сократить количество учитываемых элементов, смежных с системой электроснабжения двигателя, что уменьшает время составления и настройки модели СД и его системы электроснабжения, а также время поиска параметров такого КЗ (удаленность, марка провода, нагрузка смежных участков), при котором возникает режим с наименьшей

допустимой длительностью КНЭ при заданном значении периодической составляющей остаточного напряжения.

В табл. 3 приведены результаты расчета допустимой длительности КНЭ по практическим критериям (метод равных площадей, критерий динамической устойчивости при перерывах питания) [3, 4]. Данные результаты получены с учетом тормозного момента от тока возбуждения (m_T) и форсировки возбуждения ($E_q=1,75E_{q,ном}=4,0$ о.е.). Для проведения расчета устойчивости использованы параметры КНЭ, соответствующие опытам 3 и 4 в табл. 2 (в опыте 3 $U_{П*}=0,227$ о.е., в опыте 4 $U_{П*}=0,431$ о.е.).

Результаты показывают, что приведенные критерии устойчивости не обеспечивают необходимой точности в определении допустимой длительности КНЭ, обусловленных трехфазными КЗ в системах внешнего электроснабжения во всем диапазоне провалов напряжения. Рассмотрим особенности оценки устойчивости СД на численной модели, учитывающей полученные выше рекомендации.

Таблица 3

Оценка устойчивости СД по практическим критериям						
Критерий	Метод равных площадей t_d , с			Устойчивость при перерывах питания $t_{кр}$, с		
	$E_q=const$	$E'_q=const$	$E''_q=const$	$m_T=0$ $E_q=E_{q1}$	$m_T \neq 0$, $E_q=4$ о.е.	$m_T=0$, $E_q=4$ о.е.
Доп. длительность в опыте № 3/4, с	0,151/ 0,209	0,233/ 0,095	0,083/ 0,047	0,232/ 0,232	0,213/ 0,213	0,292/ 0,292
Погрешность в опыте 3/4, %	34,6/74, 8	0,9/88,6	64,1/94, 3	0,4/72,1	7,8/74,4	26,4/64,9

На рис. 5 показаны зависимости допустимой длительности КНЭ от момента возникновения КЗ, который определяется углом α в выражении (7). Данные результаты получены на численном примере двигателя СТД-8000, работающего при описанных выше условиях предаварийного режима и характеристиками КЗ опыта № 3 (табл. 2). На рис. 5 зависимость L_1 соответствует результатам, полученным на полной модели, когда двигатель получает питание через трансформатор (ТДН-16000/110); L_2 – результатам, полученным на полной модели, когда двигатель получает питание через трансформатор (ТДН-16000/110) и питающую линию (АС-70 длиной 20 км); L_3 – результатам, полученным на модели без учета аperiodической составляющей остаточного напряжения, когда двигатель получает питание через трансформатор (ТДН-16000/110) и питающую линию (АС-70 длиной 20 км).

Из результатов (рис. 5) следует, что разница между максимальной и минимальной допустимой длительностью КНЭ составляет менее 2 % (порядка 3 мс), что позволяет не учитывать момент возникновения КЗ с наиболее тяжелыми условиями работы двигателя.

На рис. 6 показана зависимость допустимой длительности КНЭ от глубины провала напряжения, полученная на численной модели двигателя СТД-8000, который получает питание от системы 110 кВ через трансформатор (ТДН-16000/110) и питающую линию длиной 20 км (АС-70). До КНЭ двигатель работает со следующими характеристиками: $U=0,995$ о.е. ($U_{СД}=1,07$ о.е.), $E_q=1,587$ о.е., $\delta=64,8^\circ$. На рис. 6: линия T_0 соответствует режиму без аperiodической составляющей остаточного напряжения; T_i – режиму с аperiodической составляющей, постоянная затухания которой равна i о.е.

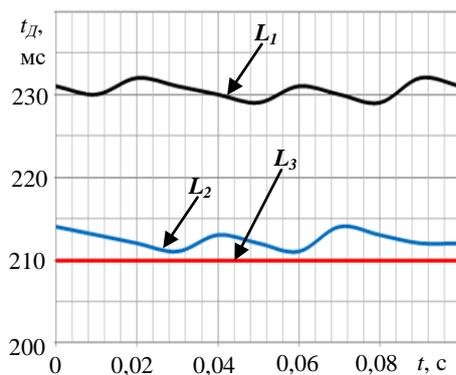


Рис. 5. Допустимая длительность КНЭ

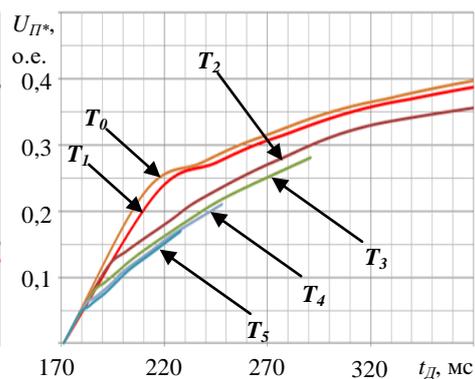


Рис. 6. Области устойчивости СД

Данные результаты показывают, что учет и увеличение постоянной затухания аperiodической составляющей напряжения приводит к увеличению допустимой длительности КНЭ. Соответственно оценка устойчивости при КНЭ без переходной составляющей остаточного напряжения позволяют получить универсальную область устойчивости, включающую области устойчивости, соответствующие всем возможным постоянным затухания переходной составляющей.

На рис. 7 показаны зависимости допустимой длительности КНЭ от значения фазового угла φ_1 без учета аperiodической составляющей остаточного напряжения. Численное исследование проведено для двигателя СТД-8000 с параметрами рабочего режима, которые были использованы для построения зависимостей на рис. 7.

Из рис. 7 следует, что допустимая длительность КНЭ в условиях одного и того же значения периодической составляющей остаточного напряжения, но при различных значениях угла φ_1 , может различаться до 36 %. Заметим, что действительное значение угла φ_1 определяется параметрами сети и находится в диапазоне от 0 до 90° и что увеличение этого угла приводит к увеличению допустимой длительности КНЭ. Следовательно, определение допустимой длительности КНЭ необходимо производить для меньшего значения фазового угла φ_1 .

На рис. 8 показаны зависимости значения фазового угла φ_1 от периодической составляющей остаточного напряжения для различных марок провода ЛЭП и сопротивлений энергосистем напряжением 110–220 кВ. Данные зависимости построены для систем, токи трехфазного КЗ которых находятся в диапазоне 4–40 кА. На рис. 7: линия L_1 – соответствует проводу марки АС-70 при напряжении 110 кВ; L_2 – АС-95 при 110 кВ; L_3 – АС-150 при 110 кВ; L_4 – АС-300 при 110 кВ; L_5 – АС-300 при 220 кВ; L_6 – АС-400 при 220 кВ. Учитывая выводы, сделанные по рис. 6, можно заключить, что оценка устойчивости СД во всем диапазоне значений остаточного напряжения должна производиться для значений фазового угла φ_1 , соответствующего ЛЭП с большим сечением провода.

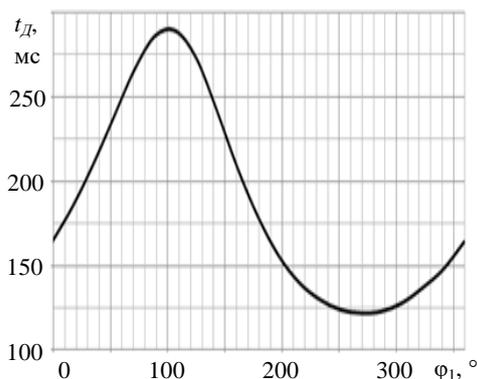


Рис. 7. Зависимость допустимой длительности от угла ϕ_1

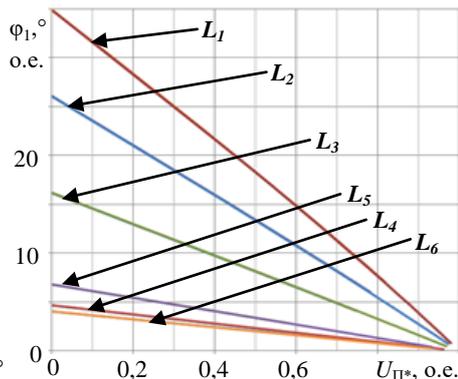


Рис. 8. Зависимости угла ϕ_1 от периодической составляющей U_{Π^*}

Полученные результаты являются основой методики оценки динамической устойчивости СД при КНЭ, обусловленных трехфазными КЗ в системе внешнего электроснабжения, которая реализуется следующими принципами:

1) численная модель СД должна учитывать закономерность изменения остаточного напряжения при КЗ согласно выражению (7), зависимость напряжения на шинах СД от распределения токов в элементах системы электроснабжения и воздействие КНЭ на двигатель через его СВ (модель 1 в табл. 2 и на рис.4);

2) оценку устойчивости во всем диапазоне значений остаточного напряжения и возможных значений постоянной затухания целесообразно производить на основе универсальной области устойчивости (рис. 6), которая строится по значения допустимой длительности КНЭ, полученным в разработанной численной модели СД (рис. 4), при провалах напряжения, описываемых выражением (7) без апериодической составляющей;

3) допускается пренебрегать влиянием момента возникновения замыкания (угол α в выражении (7)) на допустимую длительность нарушения питания;

4) при оценке устойчивости значения фазовых углов ϕ_1 в выражении (7) необходимо выбирать согласно рис. 8 исходя из величины периодической составляющей остаточного напряжения (U_{Π}) и для большего сечения провода смежных линии, подключенных к шинам районной подстанции энергосистемы.

Применение методики целесообразно при выборе и настройке устройств релейной защиты и автоматики, а также при выборе элементов системы электроснабжения по условиям устойчивости двигателей, что позволит повысить надежность функционирования СД при КНЭ в составе систем электроснабжения.

Литература

- 1.Пупин В.М., Жуков В.А., Сафонов Д.О. Модернизации схемы включения элегазового выключателя для обеспечения неотключений погружных насосов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2013. №1. С. 56–60.
- 2.Алексеев В.Ю. Защита от потери питания на перекачивающих насосных станциях: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Уфа, 2012.
- 3.Голоднов Ю. М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985. 136 с.
- 4.Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М: Высш. шк., 1985. 536 с.
- 5.Шабанов В.А., Юсупов Р.З., Алексеев В.Ю. Устройство адаптивного автоматического включения резерва на нефтеперекачивающих станциях // Электротехнические комплексы и системы. Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12, №2. С. 16–22.

6. Marini P. Immunity to voltage dips for synchronous motors // Paper submitted to the International Conference on Power Systems Transients (IPST2013). Vancouver, Canada: 2013.

7. Hyla M. Impact of voltage dips on the operations of a high-power synchronous motor with a reactive power controller // Mining-Informatics, Automation and Electrical Engineering. 2016. N2. P. 5–13.

8. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Сычев Ю.А., Плотников И.Г. Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи // Нефтегазовое дело. 2011. №3. С. 17–25.

9. Alipoor J., Doroudi A., Ghaseminezhad M. Detection of the Critical Duration of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillation // Energy and Power Engineering. 2012. N4. P. 117–124. DOI:10.4236/epe.2012.43016.

10. Carlsson F., Sadarangani C. Behavior of Synchronous Machines Subjected to Voltage Sags of Type A, B and E // European Power Electronics and Drives Journal (EPE). 2005. Vol. 15, no 4. P. 35–42.

11. Alipoor J., Doroudi A., Hosseinian S.H. Identification of the Critical Characteristics of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillations // Electric Power Components and Systems. 2014. Vol. 13, N 42.

12. Федотов А.И., Абдуллазянов Р.Э., Вагапов Г.В., Роженцова Н.В. Методика проверки эффективности токоограничивающего устройства для снижения глубины провала напряжения // Промышленная энергетика. 2016. №12. С. 28–33.

Авторы публикации

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор, Инжиниринговый центр "Компьютерное моделирование и инжиниринг в области энергетики и энергетического машиностроения" Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Абдуллазянов Рустем Эдвардович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматика» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Мударисов Рамиль Миннесалихович – соискатель, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

References

1. Pupin V.M., Zhukov V.A., Safonov D.O. Modernization of the scheme of inclusion gas-insulated switch for maintenance not switching-off of submersible pumps // Scientific-educational and applied journal. University news, north-caucasian region, technical sciences series. 2013. №1. P. 56–60.

2. Alekseev V.Yu. Power loss protection of oil pumping stations: Ph.D. (candidate) thesis in Engineering Science: 05.09.03. Ufa, 2012.

3. Golodnov Yu.M. Re-acceleration (self-synchronization) of electric motors. M.: Energoatomizdat publishing house, 1985. 136 p.

4. Venikov V.A. Electromechanical transient phenomena in electrical power systems. M.: High school publishing house, 1985. 536 p.

5. Shabanov V.A. Yusupov R.Z. Alekseev V.Yu. Device for adaptive automatic to reserve source on oil pumping stations. Electrical facilities and systems. Electrical and data processing facilities and systems. 2016. V. 12, N 2. P. 16–22.

6. Marini P. Immunity to voltage dips for synchronous motors // Paper submitted to the International Conference on Power Systems Transients (IPST2013). Vancouver, Canada: 2013.

7. Hyla M. Impact of voltage dips on the operations of a high-power synchronous motor with a reactive power controller // Mining-Informatics, Automation and Electrical Engineering. 2016. N2. P. 5–13.

8. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Sychev Yu.A., Plotnikov I.G. The dynamic stability of electrotechnical complexes with synchronous and asynchronous motors in oil and gas enterprises. // Digital Scientific magazine «Oil and Gas Engineering». 2011. N 3. P. 17–25.

9. Alipoor J., Doroudi A., Ghaseminezhad M. Detection of the Critical Duration of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillation // *Energy and Power Engineering*. 2012. N 4. P. 117–124. DOI:10.4236/epe.2012.43016.

10. Carlsson F., Sadarangani C. Behavior of Synchronous Machines Subjected to Voltage Sags of Type A, B and E // *European Power Electronics and Drives Journal (EPE)*. 2005. Vol. 15, N 4. P. 35–42.

11. Alipoor J., Doroudi A., Hosseinian S.H. Identification of the Critical Characteristics of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillations // *Electric Power Components and Systems*. 2014. Vol. 13, N 42.

12. Fedotov A.I., Abdullazyanov R.E. Vagapov G.V., Rozhentsova N.V. Effectiveness assessment methodology of voltage dip mitigation by current-limiting device // *Industrial Power Engineering*. 2016. №12. P. 28–33.

Authors of the publication

Alexander I. Fedotov – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

Rustem E. Abdullazyanov – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

Ramil M. Mudarisov – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

Поступила в редакцию

10 марта 2019 г.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТВОРНОЙ СПОСОБНОСТИ ОТРАБОТАННЫХ СОРБЕНТОВ ИЗ ОСТАТОЧНОЙ БИОМАССЫ CHLORELLA SOROKINIANA И РЯСКИ LEMNA MINOR

Е.Л. Шабуров¹, О.В. Деревянко¹, А.В. Федюхин²,
Ю.А. Смятская¹, Н.А. Политаева¹

¹Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра
Великого, Санкт-Петербург, Россия

²Национальный исследовательский университет Московский энергетический
институт, г. Москва, Россия
derevyanko_ov@spbstu.ru

Резюме: В работе рассмотрены проблемы очистки сточных вод и утилизации отработанных адсорбентов. Предложены различные способы утилизации отработанных сорбентов, изготовленных из остаточной биомассы микроводорослей *Chlorella sorokiniana* и ряски *Lemna minor*. Рассмотрена технология получения адсорбентов из сельскохозяйственных отходов (карбонизированная шелуха проса), из отходов производства терморасширенных графитов, биополимера – хитозана, и из остаточной биомассы микроводорослей *Chlorella sorokiniana* и ряски *Lemna minor*. Остаточная биомасса образуется после экстракции ценных компонентов из водорослей и ряски. Проведен термогравиметрический анализ, который показал, что разложение отработанного сорбента под действием температуры сопровождается экзотермическими эффектами в интервале температур 360–500 °С. Это позволяет рекомендовать применение отработанных сорбционных материалов в качестве топлива для получения энергии. Впервые определена удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от НП (22857–25220 кДж/кг), и от ИТМ (19 079–21 117 кДж/кг). Показано, что величины удельной теплоты сгорания отработанных сорбентов из остаточной биомассы не уступают классическим видам топлива: каменным и бурый углям. Удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от НП выше, чем удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от ИТМ. Это объясняется наличием углеводов нефти, адсорбированных на сорбентах, которые повышают калорийность вещества.

Ключевые слова: утилизация отработанных сорбентов, топливо, остаточная биомасса *Chlorella sorokiniana* и ряски *Lemna minor*, очистка воды.

Благодарности: Исследования проводились в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме проекта: «Разработка и внедрение инновационных биотехнологий переработки микроводорослей *Chlorella sorokiniana* и ряски *Lemna minor*» (СОГЛАШЕНИЕ № 14.587.21.0038 от 17 июля 2017 г.) Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58717X0038.

DETERMINATION OF THERMAL CAPACITY OF PROCESSED SORBENTS FROM RESIDUAL BIOMASS OF CHLORELLA SOROKINIANA AND DUCKWEED LEMNA MINOR

E.L. Shaburov¹, O.V. Derevianko¹, A.V. Fedyukhin²,
Yu.A. Smyatskaya¹, N.A. Politaeva¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

²National Research University Moscow Energy Institute, Moscow, Russia
derevyanko_ov@spbstu.ru

Abstract: *Our article reviews the issues arising during the process of wastewater purification and utilization of spent adsorbents. We are offering different ways of utilization of spent sorbents produced from residual biomass of Chlorella Sorokiniana microalgae and Lemna Minor duckweed. We review the technology of adsorbent production from agricultural waste (carbonized millet husks), wastes of the thermally expanded graphite and chitosan biopolymer production, and residual biomass of Chlorella Sorokiniana microalgae and Lemna Minor duckweed, which is formed after all the valuable components have been extracted from the algae and duckweed. We have conducted a thermogravimetric analysis that demonstrated that the spent sorbents' decomposition when exposed to high temperatures results in a variety of exothermic effects in the 300 to 500 °C range. This fact allows us to recommend application of spent sorbents as a fuel for energy generation.. For the first time we determine the specific heat of combustion of spent sorbents used in wastewater purification from oils (22,857–25,220 kJ/kg) and from heavy metal ions (19,079–21,117 kJ/kg). We demonstrate that the value of specific heat of combustion of spent sorbents produced from residual biomass is not less than that of classic fuels such as coals and brown coals. The specific heat value of combustion of spent sorbents used in wastewater purification from oils is higher than that of those used in wastewater purification from heavy metal ions because of the oil carbohydrates adsorbed on sorbents, which increases the material's calorific value.*

Keywords: *spent sorbents' utilization, fuel, residual biomass of Chlorella Sorokiniana microalgae and Lemna Minor duckweed, water purification.*

Acknowledgments: *The research was conducted within the Federal Target Program “Research and Development of Priority Directions of Development of Scientific and Technological Complex of Russia from 2014 to 2020”, project topic “Development and Implementation of Innovative Biotechnologies of Processing of Chlorella Sorokiniana Microalgae and Lemna Minor Duckweed” (AGREEMENT #14.587.21.0038, July 17, 2017) Unique project ID RFMEFI58717X0038.*

For citation: Shaburov E.L., Derevianko O.V., Fedyukhin A.V., Smyatskaya Yu.A., Politaeva N.A. Determination of thermal capacity of processed sorbents from residual biomass of Chlorella Sorokiniana and duckweed Lemna Minor. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):100-106. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-100-106.

Введение

Очистка сточных вод и утилизация отходов являются одними из важнейших экологических задач. Замкнутые циклы при очистке сточных вод, безотходные технологии на производстве, являются одними из приоритетных задач современной промышленности. Для снижения высокотоксичных концентраций в сточных водах используют эффективные сорбционные методы очистки. Перспективные и экономически выгодные сорбенты можно изготавливать из вторичного сырья (лигнин и целлюлозосодержащие отходы), что позволит одновременно решить сразу две проблемы: очистку воды и утилизацию отходов. Процесс

поглощения сорбентами примесей (ионов тяжелых металлов из нефтеперерабатывающих стоков нефтепродуктов) не бесконечен, и со временем адсорбент доходит до стадии насыщения и требует замены. Поэтому одной из экологических проблем использования сорбционной очистки воды, является десорбция (регенерация) и утилизация сорбента. Весьма важно не только очистить сточные воды производственных предприятий, но и добиться того, чтобы утилизируемых отходов было минимальное количество, чтобы они были нетоксичными и невредными для окружающей среды [1–4].

Сотрудниками Санкт-Петербургского политехнического университета разработана технология получения ценных компонентов из микроводорослей *Chlorella sorokiniana* и ряски *Lemna minor* [5, 6]. После выделения ценных компонентов (липидов, каротиноидов, пигментов) образуется отход (остаточная биомасса) из которого были изготовлены сорбционные материалы. Для повышения сорбционной емкости в состав сорбентов были добавлены сельскохозяйственные отходы (карбонизированная шелуха проса) [7–10], отходы производства терморасширенных графитов [11–13], в качестве связующего использовался биополимер – хитозан [14–16].

Были получены 3 вида сорбентов:

- 1 – терморасширенный графит+ хитозан+ остаточная биомасса;
- 2 – хитозан + остаточная биомасса;
- 3 – хитозан + остаточная биомасса + карбонизированная шелуха проса.

Полученные сорбционные материалы использовали для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов (ИТМ) и нефтепродуктов (НП). Процесс регенерации отработанных сорбентов экологически не безопасен и экономически не целесообразен. Поэтому нами были рассмотрены возможные способы утилизации отработанных сорбентов с получением товаров, имеющих народно-хозяйственное значение, по схеме, показанной на рисунке.



Рис. 1. Схема утилизации отработанных сорбционных материалов на основе отходов агропромышленного комплекса

Целью данной работы явилось изучение возможности утилизации отработанных сорбентов в качестве основного или резервного топлива на твердотопливных котлах.

Приборы и методы

Термогравиметрические исследования отработанных сорбентов проводили на приборе «Дериватограф» марки ОД-103 венгерской фирмы МОМ. Навеску образца массой 0,2 г. помещали в тигли из плавленного оксида алюминия и нагревали на воздухе до 1000 °С со скоростью 10 град/мин. В качестве эталона использовали прокаленный оксид алюминия, температуру регистрировали Pt-Pt/Rh термопарой. Пробоподготовка анализа заключается в измельчении отработанных сорбентов в агатовой ступке до порошкообразного состояния.

Испытания по определению удельной теплоты сгорания отработанных сорбентов проводили в лаборатории Гамбургского университета технологии (Германия) на калориметре IKA C 5000. Используемое устройство представляет собой калориметр бомбы с адиабатической рубашкой согласно DIN EN 51900-3. Отработанные сорбенты предварительно сушат при 45 °С до постоянной массы, затем измельчают до размеров менее 0,25 мм.

Согласно DIN EN 51900-1 теплотворная способность $H_{o,v}$ определяется как отношение количества тепла, выделяемого в случае полного сгорания, и массы образца при следующих предположениях:

- сжигание происходит при постоянном объеме;
- температура топлива перед сжиганием и температура его продуктов сгорания составляет 25 °С;
- вода, присутствующая в топливе перед горением, и вода, образующаяся, когда водородсодержащие соединения горючего топлива присутствуют в жидком состоянии после сгорания;
- продукты сгорания углерода и серы присутствуют в виде двуоксида углерода и двуоксида серы в газообразном состоянии;
- окисления азота не происходит.

$H_{o,v}$ определяется с помощью метода, описанного ниже, с помощью калориметра. Калориметрическая бомба помещается в водонаполненный калориметрический сосуд, который расположен в адиабатической изолирующей рубашке. После времени уравнивания температуры между калориметрической бомбой и водой в калориметрическом сосуде зажигается образец топлива. Регистрируется ход повышения температуры. Из разности температур теплотворная способность образца рассчитывалась с учетом теплоемкости калориметра:

$$H_{o,v} = \frac{C \cdot \Delta T - (Q_N + Q_S + Q_Z)}{m_p} \quad (1)$$

где $H_{o,v}$ – калорийность образца, Дж/г; ΔT – изменение температуры, К; Q_N – эволюция тепла путем образования азотной кислоты, Дж;

Генерация тепла Q_S путем образования SO_2 , Дж; Q_Z – количество внешнего тепла, Дж; m_p – масса образца, г;

C определяет теплоемкость калориметрической системы. Дж/К, согласно уравнению (2):

$$C = \frac{H_{o,v} \cdot m_B + Q_Z}{\Delta T} \quad (2)$$

где: $H_{o,v}$ – теплота сгорания эталонного вещества в джоулях на грамм;

m_B – масса эталонного вещества в граммах;

Q_Z – количество внешнего тепла, в Джоулях;

ΔT повышение температуры, определенное в калибровке, в Кельвине.

Измерение происходит в два этапа. Сначала начинается температурная компенсация между калориметрической бомбой и калориметрической водой. Это время компенсации называется предварительным экспериментом. Впоследствии основной эксперимент начинается с воспламенения образца сгорания и определения увеличения температуры.

Из заданного значения теплоты сгорания и содержания элемента теплотворная способность может быть рассчитана с использованием уравнений (3) и (4):

$$H_{u,p} = H_{o,v} - [k \cdot H + 0.8 \cdot (N + O) + k_1 \cdot w] \quad (3)$$

$$N + O = 100 - (w + A + C + H + S) \quad (4)$$

где: k – теплота испарения с учетом объемных работ воды, образующейся из водорода при горении при $25\text{ }^\circ\text{C} = 23,727\text{ Дж/}\%$;

k_1 удельная теплота испарения воды при постоянном давлении при $25\text{ }^\circ\text{C}$, $k_1=24,4\text{ Дж/}\%$;

w – аналитическая влажность топлива, % по массе;

A – зольность топлива, % по массе;

C – содержание углерода в топливе, % по массе;

H – содержание водорода в топливе, % по массе;

S – содержание серы в топливе, % по массе [17].

Погрешность измерений не превышает 2,5 %

Результаты и их обсуждение

Отработанные сорбенты после очистки нефтепродуктов подвергались термогравиметрическому анализу (погрешность измерений составляла не более 2,5 %). Данные дифференциального термогравиметрического анализа (ДТА) отработанных сорбентов состава №1, после очистки сточных вод от НП, (рис. 2) показывают, что до $120\text{ }^\circ\text{C}$ происходит удаление воды, потеря по массе составляет от 0 до 7 %. Начало разложения компонентов отработанных сорбентов начинается при $300\text{ }^\circ\text{C}$, при этом происходит разложение углеводородов (НП), адсорбированных из сточных вод. Анализ кривой ДТА показывает, что разложение отработанного адсорбента под действием температуры сопровождается экзотермическими эффектами в интервале температур $360\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$. Это подтверждает возможность применения отработанных сорбционных материалов в качестве топлива для получения энергии.

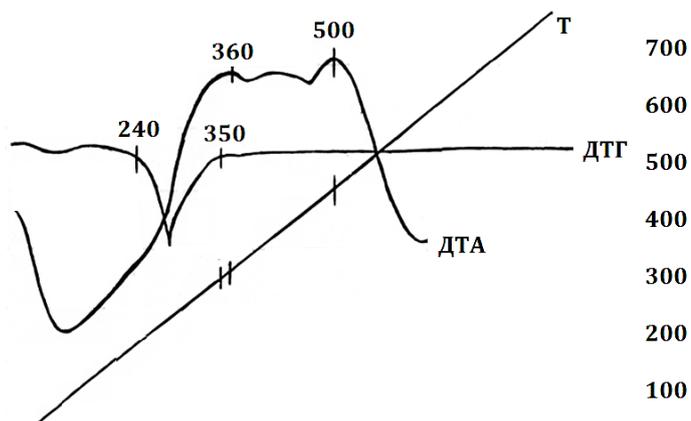


Рис. 2. Термогравиметрический анализ отработанного сорбента, после очистки сточных вод от НП

С использованием калориметра *ИКА С 5000* и формул 1–4 была определена удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от ИТМ и НП (таблица).

Таблица

Сравнительные данные удельной теплоты сгорания отработанных сорбентов и классического топлива

№	Состав сорбента	Удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от ИТМ, кДж/кг	Удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от НП, кДж/кг
1	Терморасширенный графит + хитозан+ остаточная биомасса	21 117 ± 21	25 220 ± 15
2	Хитозан + остаточная биомасса	20 674 ± 20	23 432 ± 23
3	Хитозан + остаточная биомасса + карбонизированная шелуха проса	19 079 ± 19	22 857 ± 22
Данные для сравнения [18]			
	Вид топлива	Удельная теплота сгорания, Кдж/кг	
4	Уголь древесный	29 600	
5	Уголь каменный	20 200	
6	Уголь бурый, лигнит	16 300	

Из таблицы видно, что величины удельной теплоты сгорания отработанных сорбентов из остаточной биомассы не уступают классическим видам топлива – каменным и бурым углям. Удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от НП выше (22857–25220 кДж/кг), чем удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от ИТМ. Данный факт объясняется наличием углеводородов нефти, адсорбированных на сорбентах, которые повышают калорийность вещества. В результате проведённого анализа возможно рекомендовать использование отработанных сорбентов в качестве топлива.

Выводы

В результате проделанной работы рассмотрены способы утилизации отработанных сорбентов, изготовленных из остаточной биомассы микроводорослей *Chlorella sorokiniana* и ряски *Lemna minor*. Термогравиметрический анализ показал, что разложение отработанного сорбента под действием температуры сопровождается экзотермическими эффектами в интервале температур 360–500 °С. Это позволяет рекомендовать применение отработанных адсорбционных материалов в качестве топлива для получения энергии.

Впервые определена удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от НП (22857–25220 кДж/кг), и от ИТМ (19 079–21 117 кДж/кг). Показано, что величины удельной теплоты сгорания отработанных сорбентов из остаточной биомассы не уступают классическим видам топлива – каменным и бурым углям. Удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от НП выше, чем удельная теплота сгорания отработанных сорбентов после очистки СВ от ИТМ. Это объясняется наличием углеводородов нефти, адсорбированных на сорбентах, которые повышают калорийность вещества.

Литература

1. Жумаева Д.Ж. Угольные адсорбенты для очистки сточных вод и их вторичное использование // Universum: Химия и биология: электрон. научн. журн. 2016. № 11(29). URL: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3851> (дата обращения: 30.06.2018).
2. Литвинова Т.А., Цокур О.С., Зубенко Ю.Ю., Косулина Т.П. Решение проблемы утилизации нефтесодержащих отходов с вовлечением их в ресурсооборот // Современные проблемы науки и

образования. 2012. № 6. / [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://online.rae.ru/1272> (дата обращения: 23.09.2016).

3. Мисун Л.В., Мисун И.Н., Грищук В.М. Инженерная экология в АПК. Мирск.: БГАТУ, 2007. 302 с.
4. Jumaeva D.J, Toirov O.Z. The obtainment of carbon adsorbents and their composition for clearing industrial wastewater. Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Vienna, 2016. № 3–4. P. 67–70.
5. Politaeva N., Kuznetsova T., Smyatskaya Y., Atamaniuk I., Trukhina E. Chlorella Microalga Biomass Cultivation for Obtaining Energy in Climatic Conditions of St. // Petersburg Chlorella Microalga Biomass Cultivation for Obtaining Energy in Climatic Conditions of St. Petersburg Advances in Intelligent Systems and Computing 2018.- 692, P. 555–562.
6. Natalia Politaeva*, Tatyana Kuznetsova, Yulia Smyatskaya, Elena Trukhina and Filipp Ovchinnikov. Impact of various physical exposures on Chlorella Sorokiniana microalgae cultivation// International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 12, No.21 (2017). P. 11488–11492
7. Собгайда Н.А. Влияние модифицирования шелухи пшеницы на ее сорбционные свойства к ионам Pb²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ и Cu²⁺ / Н.А. Собгайда, Л.Н. Ольшанская, Ю.А. Макарова // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2010. Т.53, №11. С.36–40.
8. Собгайда Н.А. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью сорбентов - отходов деревообрабатывающей и сельскохозяйственной отраслей промышленности / Н.А. Собгайда, Л.Н. Ольшанская, Ю.А. Макарова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 9. С.43–45.
9. Влияние природы связующего материала на сорбционные свойства сорбентов, изготовленных из отходов агропромышленного комплекса/ Н.А. Собгайда, Ю.А.Макарова. Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 1, № 1 (52). С. 116–122.
10. Sobgaida NA, Olshanskaja LN, Makarova YA. Cleaning petroleum products from waste water with composite filters based on waste products // Chemical and Petroleum Engineering . 2010; 46(3):171–177.
11. Sobgaida NA, Olshanskaja LN, Nikitina TV. Fiber and carbon materials for removing oil products from effluent // Chemical and Petroleum Engineering. 2008; 44():41–44.
12. Politaeva Natalia A, Bazarnova Julia G, et al. Impact of carbon dopants on sorption properties of chitosan-based materials // Journal of Industrial Pollution Contro-2017;33(2):1617–1621.
13. Olshanskaya AA, Sobgaida NA, Popova SS, Olshanskaja LN. New materials for sorption of hydrogen // Russian Journal of Applied Chemistry. 2004; 77(9):1505–1509.
14. Taranovskaya EA, Sobgaida NA, Markina DV. Technology for Obtaining and Using Granulated Absorbents Based on Chitosan // Chemical and Petroleum Engineering. 2016; 52(5-6):357–361.
15. Politaeva NA, Slugin VV, Taranovskaya EA, Soloviev MA, Zakharevich AM. Granulated sorption materials for waste waters purification from zink ions (Zn²⁺) // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya. 2017; 60(7):85–90.
16. Taranovskaya EA, Sobgaida NA, Markina DV. Technology for Obtaining and Using Granulated Absorbents Based on Chitosan // Chemical and Petroleum Engineering. 2016; 52(5-6):357–361.
17. Абрютин А.А. и др. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. ГОСТ 147–2013 Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания.

Авторы публикации

Шабуров Евгений Леонидович – аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого.

Деревянко Олег Владимирович – ассистент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого.

Федюхин Александр Валерьевич – доцент кафедры «Промышленные теплоэнергетические системы» Национального исследовательского университета Московского энергетического института.

Смятская Юлия Александровна – заведующий НИЛ «Промышленная экология» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого.

Политаева Наталья Анатольевна – профессор Высшей школы биотехнологий и пищевых технологий, профессор кафедры «Гражданское строительство и прикладная экология» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого.

References:

1. Zhumaeva D.ZH. Ugol'nye adsorbenty dlya ochistki stochnyh vod i ih vtorichnoe ispol'zovanie // Universum: Himiya i biologiya: ehlektron. nauchn. zhurn. – 2016. – № 11(29). URL: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3851> (data obrashcheniya: 30.06.2018).
2. Litvinova T.A., Cokur O.S., Zubenko YU.YU., Kosulina T.P. Reshenie problemy utilizatsii neftesoderzhashchih othodov s вовлечением ih v resursoobrot // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2012. – № 6. / [EHlektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: URL: <http://online.rae.ru/1272> (data obrashcheniya: 23.09.2016).
3. Misun L.V., Misun I.N., Grishchuk V.M. Inzhenernaya ehkologiya v APK. – Mn.: BGATU, 2007. – 302 s.
4. Jumaeva D.J., Toirov O.Z. The obtainment of carbon adsorbents and their composition for clearing industrial wastewater. // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2016. – № 3–4. – P. 67–70.
5. Politaeva, N., Kuznetsova, T., Smyatskaya, Y., Atamaniuk, I., Trukhina, E. Chlorella Microalga Biomass Cultivation for Obtaining Energy in Climatic Conditions of St. // Petersburg Chlorella Microalga Biomass Cultivation for Obtaining Energy in Climatic Conditions of St. Petersburg Advances in Intelligent Systems and Computing 2018. – Vol. 692, s. 555-562
6. Natalia Politaeva, Tatyana Kuznetsova, Yulia Smyatskaya, Elena Trukhina and Filipp Ovchinnikov. Impact of various physical exposures on Chlorella Sorokiniana microalgae cultivation // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12. – № 21. – Pp. 11488-11492.
7. Sobgajda N. A., Ol'shanskaya L. N., Makarova YU. A. Vliyanie modifitsirovaniya sheluhi pshenicy na ee sorbtsionnye svoystva k ionam Pb²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ i Cu²⁺ // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Seriya: Himiya i himicheskaya tekhnologiya. – 2010. – T.53, №11. – С.36 - 40.
8. Sobgajda N. A., Ol'shanskaya L. N., Makarova YU. A. Ochistka stochnyh vod ot ionov tyazhelykh metallov s pomoshch'yu sorbentov–otvodov derevoobrabatyvayushchej i sel'skohozyajstvennoj promyshlennosti // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. – 2009. – № 9. – С.43-45.
9. Sobgajda N. A., Makarova YU. A. Vliyanie prirody svyazuyushchego materiala na sorbtsionnye svoystva sorbentov, izgotovlennykh iz othodov agropromyshlennogo kompleksa // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2011. – T. 1. № 1 (52). – S. 116-122.
10. Sobgajda N.A., Olshanskaja L.N., Makarova Y.A. Cleaning petroleum products from waste water with composite filters based on waste products // Chemical and Petroleum Engineering – 2010. – Vol. 46, № 3. – P. 171-177.
11. Sobgajda N.A., Olshanskaja L.N., Nikitina T.V. Fiber and carbon materials for removing oil products from effluent // Chemical and Petroleum Engineering. – 2008. – Vol. 44, №. – P. 41-44.
12. Politaeva Natalia A., Bazarnova, Julia G. and el. Impact of carbon dopants on sorption properties of chitosan-based materials // Journal of Industrial Pollution Control-2017 – № 33 (2), – P. 1617-1621.
13. Olshanskaya A.A., Sobgajda N.A., Popova S.S., Olshanskaja L.N. New materials for sorption of hydrogen // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2004. – Vol. 77, № 9. – P. 1505-1509.
14. Taranovskaya, E.A., Sobgajda, N.A., Markina, D.V. Technology for Obtaining and Using Granulated Adsorbents Based on Chitosan // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – 52(5-6), – P. 357-361
15. Politaeva, N.A., Slugin, V.V., Taranovskaya, E.A., Soloviev, M.A., Zakharevich, A.M. Granulated sorption materials for waste waters purification from zinc ions (Zn²⁺) // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij, Seriya Khimiya i Himicheskaya Tekhnologiya. – 2017. – 60(7), – P. 85-90

© *Е.Л. Шабуров, О.В. Дервянко, А.В. Федюхин, Ю.А. Смятская, Н.А. Политаева*

16. Taranovskaya, E.A., Sobgaida, N.A., Markina, D.V. Technology for Obtaining and Using Granulated Absorbents Based on Chitosan // Chemical and Petroleum Engineering. -2016. – 52(5-6), – P. 357-361.

17. Abryutin A. A. i dr. Teplovoj raschet kotlov. Normativnyj metod. GOST 147-2013 Toplivo tverdoe mineral'noe. Opredelenie vysshej teploty sgoraniya i raschet nizshej teploty sgoraniya.

Authors of the publication

Evgeny L. Shaburov – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Oleg V. Derevianko – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Alexander V. Fedyukhin – National Research University Moscow Energy Institute, Moscow, Russia

Yulia A. Smyatskaya – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Natalia A. Politaeva – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Поступила в редакцию

14 февраля 2019 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН И ПАРАМЕТРОВ СИНФАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А.Е. Савенко, С.Е. Савенко, П.С. Савенко

Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, Республика Крым, Россия
Savenko-70@mail.ru

Резюме: Рассмотрена проблема существования синфазных и обменных колебаний мощности при параллельной работе синхронных генераторов в автономных электротехнических комплексах. Методами математического моделирования получены значения амплитуды и периода синфазных колебаний во всем возможном диапазоне настроек исследуемого объекта. Разработана методика построения карт зависимости амплитуды и периода синфазных колебаний мощности от значений коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения регуляторов частоты вращения дизель-генераторов. Использование таких карт позволяет применить метод устранения обменных колебаний мощности с учетом возможного возникновения синфазных колебаний. Построение карт настроек амплитуды и периода синфазных колебаний мощности дает возможность понять тенденцию изменения амплитуды и периода синфазных колебаний мощности и проведения глубокого анализа работы автономного электротехнического комплекса.

Ключевые слова: обменные колебания мощности, синфазные колебания мощности, параллельная работа, автономный электротехнический комплекс, генераторный агрегат, экспериментальные исследования.

STUDY OF THE REASONS AND PARAMETERS OF COMMON-MODE FLUCTUATIONS OF POWER IN AUTONOMOUS ELECTRICAL COMPLEXES

A.E. Savenko, S.E. Savenko, P.S. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea Russia
Savenko-70@mail.ru

Abstract: The problem of the existence of common-mode and exchange power fluctuations when parallel operation of synchronous generators in autonomous electrical systems is considered. The methods of mathematical modeling obtained the amplitude and period of common-mode oscillations in the whole possible range of settings of the object under study. A method has been

developed for constructing maps of the dependence of the amplitude and period of common-mode power oscillations on the values of the transfer coefficients and setpoints in terms of the rotation frequency of the speed governors of diesel generators. The use of such cards allows you to apply the method of eliminating exchange power fluctuations, taking into account the possible occurrence of common-mode oscillations. Mapping the settings of the amplitude and the period of the common-mode power oscillations makes it possible to understand the tendency of the amplitude and the period of the common-mode power oscillations to change and to carry out an in-depth analysis of the operation of the autonomous electrotechnical complex.

Keywords: exchange power fluctuations, common-mode power fluctuations, parallel operation, autonomous electric power equipment, generating set, experimental research.

For citation: Savenko A.E., Savenko S.E., Savenko P.S. Study of the reasons and parameters of common-mode fluctuations of power in autonomous electrical complexes. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):107-115. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-107-115.

Введение

Параллельная работа дизель-генераторных агрегатов на основе синхронных генераторов является наиболее часто применяемым режимом производства электрической энергии в автономных электротехнических комплексах [1, 2]. Преимущества такой компоновки хорошо известны, это – рациональное использование вырабатываемой электроэнергии, обеспечение надежности электростанции, работы агрегатов с наивысшими коэффициентами полезного действия и возможности ремонта отдельных агрегатов, экономия топлива и ресурса агрегатов [3, 4]. Для исследования обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов проводились экспериментальные исследования на судне-пароме «Ейск» Керченской паромной переправы [5, 6]. При этом обнаружены синфазные колебания мощности.

На осциллограммах токов генераторов при работающих гребных двигателях, получающих питание через тиристорные преобразователи (рис. 1–4), наблюдаются автоколебательные процессы с разными амплитудами и периодами. Форма этих колебаний также имеет разный характер. Амплитуда колебаний достигает 100 %, а период 150–800 мс [6].

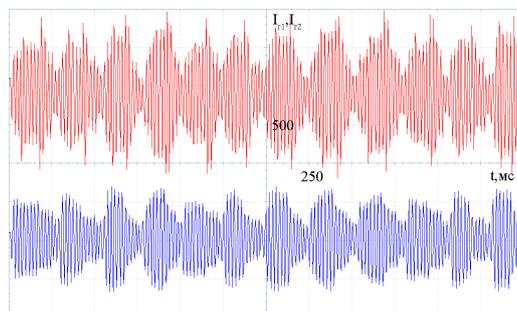


Рис. 1. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 1)

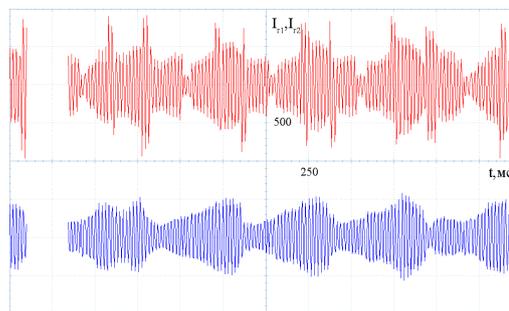


Рис. 2. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 2)

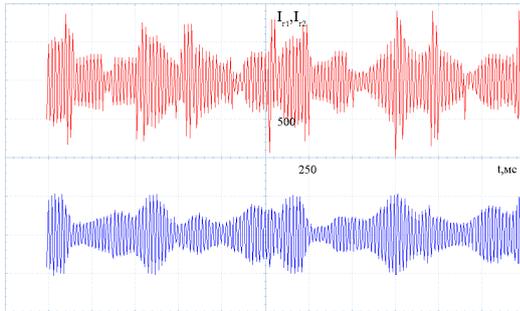


Рис. 3. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 3)

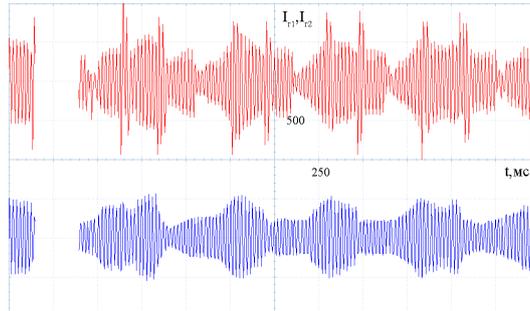


Рис. 4. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 4)

Результаты проведенных исследований выявили, что амплитуда обменных колебаний мощности параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов зависит от значений зазоров люфта в контурах регулирования частот вращения [6, 7]. Разработана методика построения карт зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от значений зазоров люфтов [8]. Необходимо провести аналогичную работу по отношению к синфазным колебаниям.

Методы

Для исследования причин и природы синфазных колебаний мощности при работе электростанции автономного электротехнического комплекса используется математическая модель [9, 10], позволяющая построить графики мгновенных значений основных параметров параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов.

В математической модели используется уравнение дизеля, который является приводным двигателем генераторного агрегата, в упрощенной форме:

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} = M_d - M_g;$$

$$M_d = K_m h; M_g = \Psi_{sq} i_{sd} - \Psi_{sd} i_{sq},$$

где J_m – приведенный момент инерции вала дизеля и ротора генератора; M_d – механический момент дизеля; M_g – электромагнитный момент сопротивления, развиваемый генератором; h – положение топливной рейки; K_m – коэффициент усиления дизеля по частоте вращения.

Отдельным уравнением описан регулятор частоты вращения дизеля, который представлен аperiodическим звеном первого порядка:

$$T_\omega \frac{dh}{dt} = K_\omega U_\varepsilon - h,$$

где T_ω – постоянная времени исполнительного механизма; K_ω – коэффициент передачи (усиления) регулятора; U_ε – сигнал рассогласования между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения дизеля.

Для математического описания люфта с зазором D_n в контуре регулирования частоты вращения дизеля используем следующее выражение:

$$U_\varepsilon = \left\{ \begin{array}{l} U_\varepsilon = \text{const для } |U_\varepsilon - k\varepsilon| \leq D_n \\ k \left(\varepsilon - D_n \text{sign} \left(\frac{dU_\varepsilon}{dt} \right) \right) \text{ для } \frac{dU_\varepsilon}{dt} \neq 0 \end{array} \right\},$$

где k – коэффициент передачи; D_n – зазор люфта; ε – рассогласование между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения дизеля.

Таким образом, каждый дизель-генераторный агрегат, участвующий в параллельной работе, имеет автоматический регулятор частоты вращения с двумя основными изменяемыми параметрами: коэффициентом передачи K_ω и уставкой по частоте вращения [11] ω_{r0} , а также люфтом с зазором D_n .

Основной задачей исследования является поиск ответа на вопрос: есть ли связь между настройками и параметрами контуров регулирования скорости вращения дизель-генераторных агрегатов и синфазными колебаниями мощности при параллельной работе. Также важно понять, от чего зависят амплитуда и период синфазных колебаний и систематизировать полученные результаты, так как результаты натуральных экспериментов доказывают их изменчивость.

Математическая модель дает возможность проведения анализа синфазных колебаний мощности, возникающих при параллельной работе двух синхронных генераторов автономного электротехнического комплекса в квазиустановившихся режимах.

При проведении исследований прием диапазон изменения коэффициентов передачи регуляторов K_ω от 10 до 200, уставок по частоте вращения регуляторов ω_{r0} от 0,9 до 1,1, что соответствует устойчивой параллельной работе генераторных агрегатов. Необходимо учитывать люфт, так как во время экспериментальных исследований на пароме «Ейск» стала понятна связь обменных и синфазных колебаний мощности, и это важно при реализации мер и средств по устранению обменных колебаний для обеспечения качественной устойчивой параллельной работы генераторов. Введем в математическую модель зазоры люфтов контуров регулирования скорости вращения дизель-генераторов соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$. Для исключения влияния переходных процессов на результаты выберем временной диапазон от 12 до 15 секунд, что заведомо соответствует квазиустановившемуся режиму работы.

Результаты моделирования подтверждают существование синфазных колебаний мощности и позволяют определить их амплитуду и период. Для этой цели будем использовать токи $IA1$, $IA2$ параллельно работающих генераторов.

Результаты

Математическое моделирование параллельной работы дизель генераторных агрегатов, коэффициентов передачи регуляторов которых не равны, подтвердило предположение о возникновении синфазных колебаний в таком режиме работы (рис. 5).

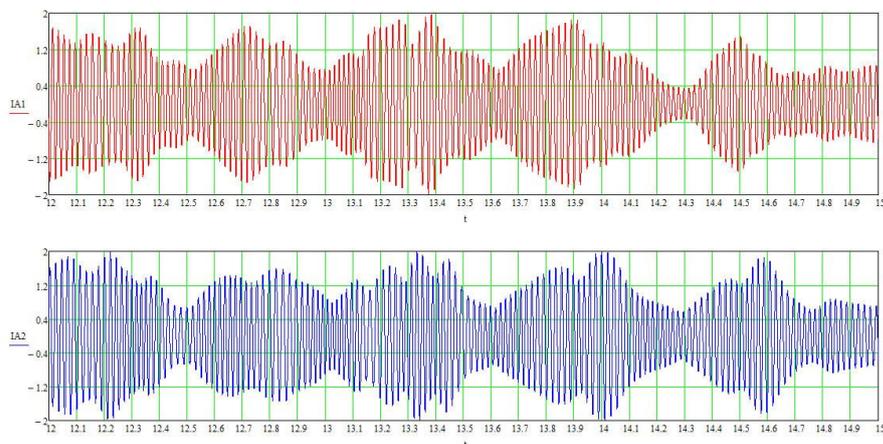


Рис. 5. Результаты моделирования: $D_{n1}=0,002$; $D_{n2}=0,01$; $K_{\omega1}=40$; $K_{\omega2}=80$; $\omega_{r01}=1$; $\omega_{r02}=1$.

$IA1, IA2$ – токи параллельно работающих генераторов

Причем выборочное моделирование давало основание думать, что амплитуда колебаний увеличивается с увеличением разницы коэффициентов передачи регуляторов параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов. Ясность характера зависимости параметров синфазных колебаний от соотношения коэффициентов передачи регуляторов частоты появилась после моделирования всего поля возможных соотношений настроек (табл. 1, 2) и построения графической визуализации полученных результатов в виде карты настроек (рис. 6, 7). Необходимо отметить, что при равных значениях коэффициентов усиления синфазные колебания отсутствуют, а полученные результаты в таблицах соответствуют амплитудам обменных колебаний мощности. Это главная диагональ таблиц слева направо сверху вниз.

Также в ходе математического моделирования обнаружено влияние различия уставок по частоте вращения регуляторов частоты параллельно работающих генераторных агрегатов на возникновение синфазных колебаний мощности (рис. 8).

Таблица 1

Зависимость амплитуды синфазных колебаний мощности первого дизель-генератора от значений коэффициента усиления регулятора частоты

$K_{\omega1}/K_{\omega2}$	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
10	0,01	1,1	1	0,9	0,75	1,1	0,3	0,25	0,25	0,25	0,25
20	0,95	0,01	1,1	1	1,1	0,85	1,1	1,1	0,8	0,85	0,85
40	0,9	0,85	0,05	0,9	1,05	1,05	1,1	1,25	1,05	1,1	1,05
60	1,1	0,85	1,1	0,05	0,3	0,9	0,7	0,95	1	0,95	1,05
80	0,95	1	0,8	0,2	0,05	0,2	0,9	1,2	0,9	1,2	1,1
100	0,7	0,9	1,2	1	0,25	0,05	0,16	0,8	1,05	0,8	1,25
120	0,55	0,75	1,1	0,9	0,9	0,15	0,06	0,13	1,25	0,8	1,3
140	0,75	1,2	1,1	0,9	0,9	0,22	0,15	0,06	0,13	0,7	1,1
160	1,1	1,2	1,2	0,9	0,9	0,75	0,3	0,12	0,06	0,11	0,65
180	1,1	1,2	1,2	1,05	1,05	0,75	0,7	0,23	0,14	0,06	0,1
200	1,1	1	0,9	1,05	1,1	0,75	0,7	0,6	0,2	0,13	0,07

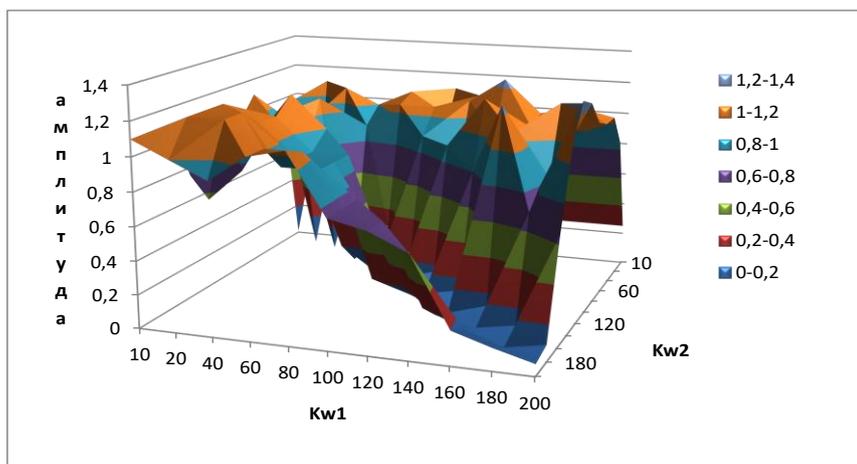


Рис. 6. Карта зависимости амплитуды синфазных колебаний мощности первого дизель-генератора от значений коэффициента усиления регулятора частоты. $K_{\omega1}$ и $K_{\omega2}$ – коэффициенты усиления регулятора первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

Зависимость амплитуды синфазных колебаний мощности второго дизель-генератора от значений коэффициента усиления регулятора частоты

$K_{\omega 1} / K_{\omega 2}$	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
10	0,01	1,2	1	0,9	0,9	1,2	0,5	0,45	0,4	0,3	0,3
20	1	0,01	0,9	1	1	1	1,1	0,95	0,8	0,75	0,9
40	0,8	0,65	0,05	1	1,1	0,9	1,2	1,2	1,35	1	1,2
60	1,1	0,95	0,95	0,05	0,3	0,9	0,7	0,95	0,95	1,05	1,1
80	1	1	0,8	0,25	0,05	0,25	0,7	1,1	0,9	1	1,3
100	0,6	0,7	1,1	1,1	0,2	0,05	0,22	0,8	0,8	0,6	1,1
120	0,4	1	1,2	1	1,1	0,1	0,06	0,17	1,1	0,8	1,2
140	0,6	1,1	1,2	0,9	0,95	0,22	0,08	0,06	0,17	0,7	1,05
160	1,2	1	1,2	0,7	0,8	0,6	0,25	0,09	0,06	0,17	0,6
180	1,1	1,2	1,05	1,1	1,2	0,75	0,7	0,2	0,07	0,06	0,14
200	1	1,05	0,95	1,05	1,05	0,75	0,7	0,6	0,15	0,06	0,07

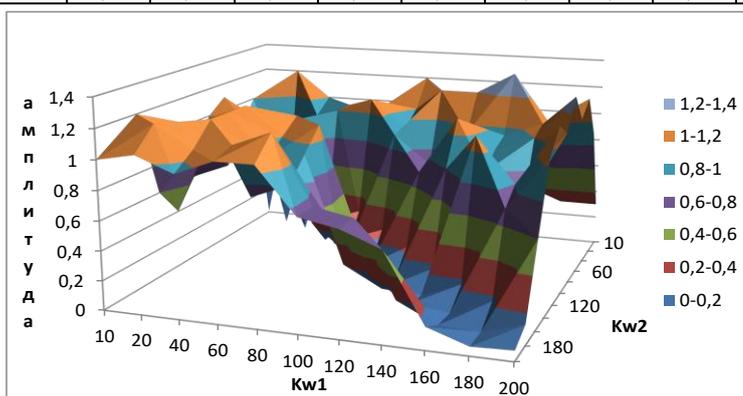


Рис. 7. Карта зависимости амплитуды синфазных колебаний мощности второго дизель-генератора от значений коэффициента усиления регулятора частоты. $K_{\omega 1}$ и $K_{\omega 2}$ – коэффициенты усиления регулятора первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

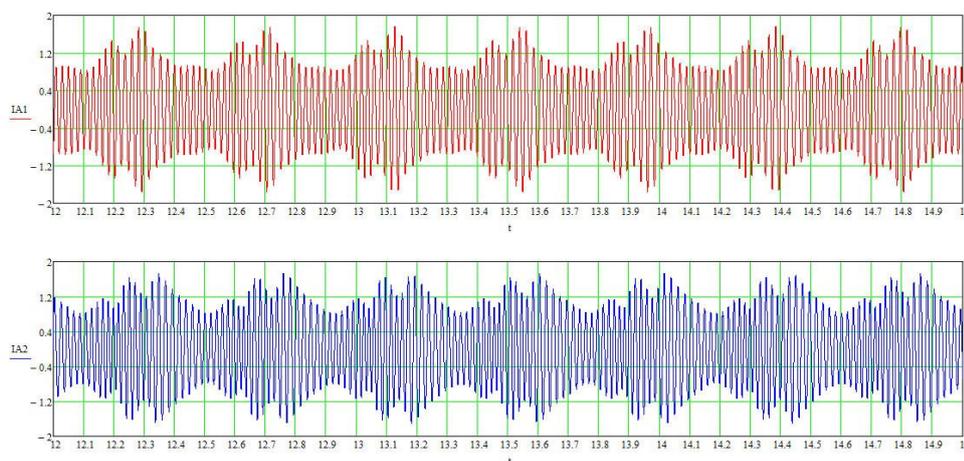


Рис. 8. Результаты моделирования: $D_{n1}=0,002$; $D_{n2}=0,01$; $K_{\omega 1}=50$; $K_{\omega 2}=50$; $\omega_{r01}=1,04$; $\omega_{r02}=0,94$. IA1, IA2 – токи параллельно работающих генераторов

Причем выборочное моделирование давало основание думать, что период синфазных колебаний уменьшается с ростом разницы уставок по скорости. Ясность характера зависимости параметров синфазных колебаний от соотношения уставок по частоте вращения регуляторов частоты появилась после моделирования всего поля возможных соотношений настроек (таблица 3) и построения графической визуализации полученных результатов в виде карты настроек (рис. 9). Необходимо отметить, что при равных значениях уставок по частоте вращения синфазные колебания отсутствуют, а полученные результаты в таблице соответствуют периоду обменных колебаний мощности. Это также главная диагональ таблицы слева направо сверху вниз. По результатам моделирования периоды синфазных колебаний мощности у обоих генераторных агрегатов можно считать одинаковыми.

Таблица 3

Зависимость периода синфазных колебаний мощности от значений уставки скорости регулятора частоты

$\omega_{r01}/\omega_{r02}$	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1
0,9	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1
0,92	0,4	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,15	0,15	0,15	0,1
0,94	0,45	0,4	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,15	0,15	0,15
0,96	0,4	0,5	0,4	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,15	0,15
0,98	0,5	0,4	0,5	0,45	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,15
1	0,45	0,5	0,4	0,5	0,4	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4
1,02	0,15	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5
1,04	0,1	0,15	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,55	0,45	0,5	0,4
1,06	0,1	0,15	0,15	0,4	0,5	0,4	0,5	0,45	0,55	0,4	0,5
1,08	0,1	0,15	0,15	0,15	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,55	0,4
1,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,15	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,55

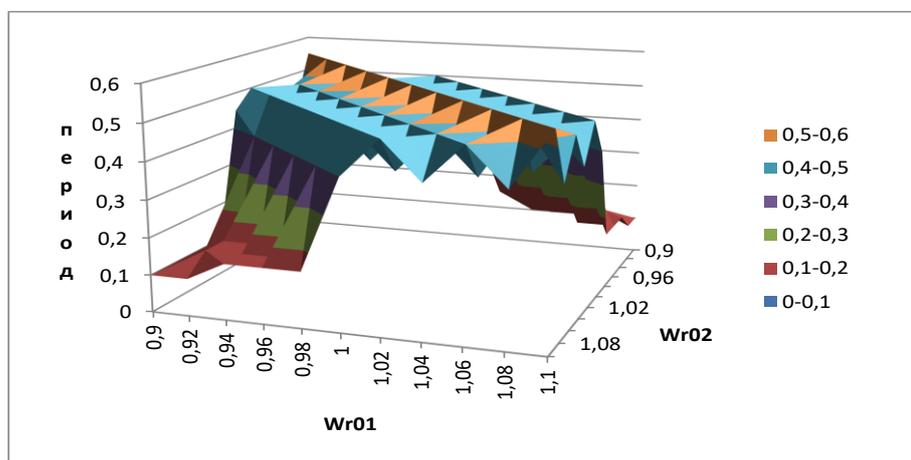


Рис. 9. Карта зависимости периода синфазных колебаний мощности дизель-генераторов от значений уставок по скорости регулятора частоты. ω_{r01} и ω_{r02} – уставки по скорости регулятора первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

Обсуждение

В результате проведенных исследований выяснилось, что синфазные колебания мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов могут появляться в

результате неодинаковых значений настроек коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения регуляторов. В начале отклонения коэффициентов передачи от равных значений наблюдается рост амплитуды синфазных колебаний. При достижении некоторых предельных значений амплитуда начинает колебаться вокруг этих значений (см. рис. 6, 7). Амплитуда синфазных колебаний существенно превосходит амплитуду обменных колебаний мощности при одних и тех же значениях зазора люфта. Необходимо отметить, что амплитуда синфазных колебаний параллельно работающего генератора, коэффициент передачи регулятора которого больше, также больше. Это связано с тем, что этот генератор возьмет на себя больше нагрузки. Однако разница в нагрузке не может быть значительной по условиям параллельной работы генераторных агрегатов равной мощности, а следовательно, и амплитуды синфазных колебаний отличаются не намного, обычно разница составляет не более 10–15 %.

При отклонении уставок по частоте от равных значений наблюдаются синфазные колебания, амплитуда которых не меняется, а период уменьшается незначительно в некоторых пределах, а затем происходит стремительное его уменьшение и стабилизация на значениях в несколько раз меньших (см. рис. 9).

Полученные карты, кроме общей информации, детально описывают синфазные колебания мощности для дизель-генераторов 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800 кВА и могут быть полезны специалистам, которые эксплуатируют и настраивают такие агрегаты. Аналогичные исследования, направленные на построение карт зависимости параметров синфазных колебаний мощности от значений настроек коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения регуляторов могут быть проведены для любых дизель-генераторных агрегатов.

Заключение

Полученные в исследовании результаты являются развитием работы [6], направленной на исследование колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов в составе автономных электротехнических комплексов. Разработанная методика построения карт зависимости амплитуды и периода синфазных колебаний мощности от значений коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения регуляторов позволяет значительно улучшить качество параллельной работы дизель-генераторных агрегатов. Алгоритм устранения обменных колебаний мощности основан на изменении коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения регуляторов. С учетом полученных результатов для сохранения устойчивой работы автономного электротехнического комплекса изменение настроек регуляторов частоты у параллельно работающих агрегатов необходимо производить синхронно. Время изменения настроек ведомых агрегатов должно быть на порядок меньше времени изменения настроек ведущего дизель-генератора [12]. Построение карт настроек амплитуды и периода синфазных колебаний мощности совместно с картами настройки амплитуды обменных колебаний мощности в зависимости от зазоров люфта дает возможность глубокого анализа работы автономного электротехнического комплекса.

Литература

1. Лежнюк П.Д. Оптимизация распределения нагрузки между рассредоточенными источниками энергии в локальной электрической системе / П.Д. Лежнюк, В.В. Нетребский, А.В. Никиторович // *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 38–39.
2. Грачева Е.И. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения / Е.И. Грачева, Р.Р. Садыков // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т.19, № 1-2. С. 95–101.
3. Грачева Е.И. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий / Е.И. Грачева, И.И. Ильясов, А.Н. Алимова // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018. Т.20, № 3-4. С. 62–71.

4. Ившин И.В. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок / М.Ф. Низамиев, И.В. Ившин, О.В. Владимиров, Ю.В. Ваньков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 109–114.

5. Хватов О.С. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Электротехника. 2014. № 3. С. 28–32.

6. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах // Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина., 2016. 172 с.

7. Pyrhonen J. Design of Rotating Electrical Machines / Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Val'eria Hrabovcov'a. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. 531 p.

8. Савенко А.Е. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах / А.Е. Савенко, П.С. Савенко // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 5-6. С. 46–54.

9. Савенко А.Е. Математическая модель судового электротехнического комплекса // Вестник ИГЭУ. 2015. № 5. С. 54–59.

10. Голубев А.Н. Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами / А.Н. Голубев, В.А. Мартынов, А.В. Алейников // Вестник ИГЭУ. 2015. № 1. С. 10–13.

11. Reimert D. Protective relaying for power generation systems / D. Reimert. Taylor and Francis Group, LLC. 2006. 545 p.

12. Тютиков В.В. Методика синтеза регуляторов для независимого формирования статических и динамических показателей нелинейных объектов / В.В. Тютиков, А.И. Воронин // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 3(164). С. 154–164.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» Керченского государственного морского технологического университета. E-mail: Savenko-70@mail.ru.

Савенко Станислав Евгеньевич – магистрант направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» Керченского государственного морского технологического университета.

Савенко Павел Станиславович – курсант морского факультета Керченского государственного морского технологического университета.

References

1. Lezhnyuk P.D., Netrebskiy V.V., Nikitorovich A.V. Optimizatsiya raspredeleniya nagruzki mezhdu rassredotochennymi istochnikami energii v lokal'noy elektricheskoy sisteme [Optimization of partition of load between the dispersed energy sources in the in-plant electric system] // Tekhnichna elektrodinamika. 2012. Issue 2. P. 38–39.

2. Gracheva E.I., Sadykov R.R. Issledovanie veroyatnostnykh kharakteristik sistem elektrosnabzheniya [The study of probabilistic characteristics of power supply systems] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2014. Issue 3-4. P. 109–114.

3. Gracheva E.I. Sravnitel'nyj analiz i issledovanie metodov rascheta poter' jelektroenergii v sistemah jelektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij / E.I. Gracheva, I.I. P'jasov, A.N. Alimova [The comparative analysis and research of methods of calculation of losses of the electric power in the systems of electrical power supply of the industrial enterprises]. // Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2018. B. 20, issue 3-4. P. 62–71.

4. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Van'kov Yu.V. Izmeritel'no-diagnosticheskiy kompleks dlya diagnostiki energeticheskikh ustanovok [Measuring-diagnostic complex for the diagnosis of

- power plants] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2014. Issue 3-4. P. 109–114.
5. Khvatov O.S., Dar'entov A.B. Elektrostantsiya na baze dizel'-generatora peremennoy chastoty vrashcheniya [Power on the basis of diesel generator variable speed] // Elektrotehnika. 2014. Issue. 3. P. 28–32.
6. Savenko A.E., Golubev A.N. Obmennye kolebaniya moshchnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh [Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes]. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina, 2016. 172 p.
7. Pyrhonen J. Design of Rotating Electrical Machines / Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Val'eria Hrabovcov'a. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. 531 p.
8. Savenko A.E. Vlijanie ljufta na amplitudu obmennykh kolebaniy moshchnosti v avtonomnykh jelektrotekhnicheskikh kompleksakh [Influence of backlash on amplitude of exchange power fluctuations in autonomous electric power equipment]. / A.E. Savenko, P.S. Savenko // Izvestija vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2018. B. 20, issue 5-6. P. 46–54.
9. Savenko A.E. Matematicheskaya model' sudovogo elektrotekhnicheskogo kompleksa [A mathematical model of the ship's electrical complex]. // Vestnik IGEU. 2015. Issue 5. P. 54–59.
10. Golubev A.N. Matematicheskaya model' dlya rascheta elektromagnitnykh sil v sinkhronnom elektroprivode s postoyannymi magnitami [Mathematical model for simulation of electromagnetic forces in permanent magnet synchronous motors] // Vestnik IGEU/ 2015/ Issue 1. P. 10–13.
11. Reimert D. Protective relaying for power generation systems / D. Reimert. Taylor and Francis Group, LLC, 2006. 545 p.
12. Tyutikov V.V., Voronin A.I. Metodika sinteza regulyatorov dlya nezavisimogo formirovaniya staticheskikh i dinamicheskikh pokazateley nelineynykh ob"ektov [Procedure for the synthesis of controllers for independent formation of static and dynamic parameters of nonlinear objects] // Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2015 Issue 3(164) P. 154–164.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko – Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea Russia
E-mail: Savenko-70@mail.ru.

Stanislav E. Savenko – Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea Russia

Pavel S. Savenko – Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea Russia

Поступила в редакцию

19 февраля 2019 г.

ФИЗИКА



УДК 593.3

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СТЕФАНА В ГИПЕРБОЛИЧЕСКОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Э.М. Карташов¹, И.А. Соловьев²

¹Московский технологический университет (МИТХТ), г. Москва, Россия

e-mail: kartashov@mitht.ru

²Государственный университет по землеустройству, г. Москва, Россия

e-mail: igorsoloviev@inbox.ru

Резюме: Предложено стохастическое описание задачи Стефана на основе детерминированной модели в гиперболическом описании. Это описание основано на обобщенном уравнении Фоккера-Планка Колмогорова. Основное положение таково: детерминированные уравнения и их решения – есть средние значения стохастической модели задачи Стефана. Рассмотрена проблема деформирования фронта фазового перехода. Исследование производится с помощью введенного положения устойчивости по дисперсии решений для средних значений. Результатом исследования является тот вывод, что влияние марковского коэффициента диффузии приводит к значительному искажению первоначально плоского фронта границы раздела фаз.

Ключевые слова: Задача Стефана, гиперболическое уравнение теплопроводности, обобщенное уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова, устойчивость решений дифференциальных уравнений, деформация фронта фазового перехода.

THE STOCHASTIC FORMULATION OF THE STEPHAN'S PROBLEM IN HYPERBOLIC REPRESENTATION

E.M. Kartashov¹, I.A. Soloviev²

¹State Technological University (MITHT), Moscow, Russia

e-mail: kartashov@mitht.ru

²State University of Land Management, Moscow, Russia

e-mail: igorsoloviev@inbox.ru

Abstract: The presented work offers the stochastic description of the Stephan's problem in hyperbolic representation equation. This description is based on the generalized Fokker-Planck-Kolmogorov equation. The basic thesis of this work is that the determined equalizations and their decisions are the average values of stochastic Stephan's task model. This work considers the problem of phase transition front deformation. The research is performed using the entered position of stability on dispersion of decisions for average values. The conclusion of the study is that Markov's diffusion coefficient leads to a significant distortion of the originally flat front of the phase boundary.

Keywords: *Stefan problem, hyperbolic equation of heat conduction, generalized equation of the Fokker-Planck-Kolmogorov, stability of solutions of differential equations, deformation of the phase transition front.*

For citation: Kartashov E.M., Soloviev I.A. The stochastic formulation of the Stefan's problem in hyperbolic representation. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):116-126. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-116-126.

Введение

Перечислим проблемы, относящиеся к детерминированному описанию теплопроводности при фазовых превращениях. Первая проблема, касающаяся детерминированных моделей Фурье и классической задачи Стефана [1], заключается в бесконечности скорости распространения начальных возмущений температуры, а также бесконечности начальной скорости перемещения границы раздела фаз. Вторая проблема состоит в том, что в детерминированной модели не описывалась деформация с течением времени первоначально плоской формы фазового перехода.

Исследование эффектов при быстропротекающих проявлениях теплопроводности восходит к работам Максвелла–Каттанео–Лыкова, описанных в работах [2, 3]. В этих работах описывается обобщенный закон Фурье:

$$\partial \bar{q}(x, y, z, t) / \partial x = -\lambda \text{grad} T(x, y, z, t) - \tau_r \partial q(x, y, z, t) / \partial t, \quad (1)$$

учитывающий конечную скорость распространения теплоты. Здесь (x, y, z) – пространственные координаты; t – временная координата; \bar{q} – плотность теплового потока; T – температура; λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности; τ_r – время релаксации теплового потока, связанное со скоростью распространения теплоты v_T соотношением $v_T = \sqrt{a/\tau_r}$. Соотношение (1) имеет простой физический смысл: при возникновении градиента температуры необходимо некоторое время для установления теплового потока, когда $\text{grad} T = 0$, тепловой поток не пропадает мгновенно, а затухает со временем релаксации τ_r . Проанализировав обобщенную задачу теплопроводности для полупространства, граничное значение температуры которого изменяется в начальный момент времени на некоторую величину, оставаясь далее постоянным, А.В. Лыков дал обоснование физического смысла конечной скорости распространения теплоты, представляющей собой производную по времени от глубины проникновения теплоты. Выражение (1) приводит к детерминированному уравнению переноса гиперболического типа:

$$\begin{aligned} \partial T(M, t) / \partial t = a \Delta T(M, t) - \tau_r \partial^2 T(M, t) / \partial t^2 + \\ + (\tau_r / (cp)) \left[\partial F(M, t) / \partial t + (1 / \tau_r) F(M, t) \right], \quad M \in D, \quad t > 0 \quad (2) \end{aligned}$$

и соответствующим краевым задачам теплопроводности для уравнения (2) *обобщенного вида*. Обобщенные задачи переноса значительно отличаются от классических, являясь более сложными при нахождении аналитических решений этих задач. Отсюда весьма незначительные успехи в нахождении точных аналитических решений краевых задач для уравнения (2). Как будет показано ниже, эти аналитические значения участвуют в формировании дисперсии. В то же время необходимо отметить значительное внимание к проблеме Стефана со стороны физиков, изучающих влияние лазерного излучения на вещество [5–9].

В настоящей работе предложено описание случайного поведения высоконестационарной теплопроводности с помощью обобщенного уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (в дальнейшем ФПК) для плотности вероятности (в дальнейшем ПВ), из которого получают постановки задач для гиперболического уравнения теплопроводности. Новизна заключается в том, что стохастические постановки задач Стефановского типа гиперболической теплопроводности до сих пор отсутствовали. Библиография и основные идеи такого стохастического описания задач теплопроводности изложены в работах [2, 3], Основное положение представляется таким: решение детерминированной задачи есть среднее значение ее стохастического аналога. Актуальность проблемы заключается в том, что детерминированная задача не позволяет выявить особенности, возникающие в результате учета случайного внешнего воздействия на описываемые явления. В работе [3] показано, как дисперсия может существенно изменить представления о выводах, следующих из анализа детерминированных решений поставленных задач. Исследование временного поведения дисперсии позволило получить описанный в работе [3] эффект убывания дисперсии в начальные моменты времени. Этот эффект дает возможность планировать эксперименты, связанные с фазовыми переходами. Здесь будет рассмотрен анализ дисперсии при мощном импульсном тепловом воздействии на вещество.

Стохастическая модель задачи Стефана, учитывающая конечную скорость переноса теплоты

Стохастическая модель классической задачи Стефана, основанная на обобщенном уравнении ФПК, связанном с параболическим уравнением теплопроводности, предложена в работе [3]. Приведем постановку этой задачи. Вначале введем обозначения для стохастического описания задачи Стефана при учете конечной скорости переноса теплоты. Обозначим через $P_1(x, t, \Omega)$ плотность вероятности в пространственной области $0 \leq x \leq M_y^{(1)}(t)$ (твердая фаза), а через $P_2(x, t, \Omega)$ – плотность вероятности в пространственной области $x \geq M_y^{(1)}(t)$ (жидкая фаза), где $M_y^{(1)}(t)$ – среднее значение скорости движения границы раздела фаз; t – время; x – пространственная координата; Ω – случайная характеристика температурного поля в обеих областях. Обозначим также средние значения: $M_{Ti}^{(1)}(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Omega P_i(x, t, \Omega) d\Omega$ ($i = 1, 2$); момент второго порядка так:

$$M_{Ti}^{(2)}(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Omega^2 P_i(x, t, \Omega) d\Omega, \quad (i = 1, 2); \quad \text{дисперсию} \quad \text{так:}$$

$$D_{Ti}(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Omega^2 P_i(x, t, \Omega) d\Omega - \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \Omega P_i(x, t, \Omega) d\Omega \right)^2 \quad (i = 1, 2). \quad \text{Введем также}$$

обозначение для ПВ, описывающей случайные процессы, происходящие на границе раздела фаз: $P_y(t, \Theta)$, здесь Θ – случайная характеристика процессов, определяющих поведение границы раздела фаз. Обозначим среднее значение зависимости от времени закона движения границы раздела фаз так: $M_y^{(1)}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta P_y(t, \Theta) d\Theta$, а дисперсию –

$$D_y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta^2 P_y(t, \Theta) d\Theta - \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \Theta P_y(t, \Theta) d\Theta \right)^2. \quad \text{Марковский коэффициент диффузии для}$$

случайных проявлений на границе обозначим B_Θ . Уравнение ФПК для ПВ, описывающей случайное тепловое поле в области твердого состояния, имеет вид

$$\partial P_1(x, t, \Omega) / \partial t = -\partial(A_1(x, t, \Omega)P_1(x, t, \Omega)) / \partial \Omega + 0,5B_\Theta \partial^2 P_1(x, t, \Omega) / \partial \Omega^2, \quad (3)$$

$$0 < x < M_y^{(1)}(t), \quad t > 0, \quad \Omega \in (-\infty < +\infty).$$

Здесь

$$A_1(x, t, \Omega) = \Omega(a_1 \partial^2 M_{T1}^{(1)}(x, t) / \partial x^2 - \tau_r \partial^2 M_{T1}^{(1)}(x, t) / \partial t^2) / M_{T1}^{(1)}(x, t).$$

Аналогичный вид имеет коэффициент сноса $A_2(x, t, C)$:

$$\partial P_2(x, t, \Omega) / \partial t = -\partial(A_2(x, t, \Omega)P_2(x, t, \Omega)) / \partial \Omega + 0,5B_{\Omega} \partial^2 P_2(x, t, \Omega) / \partial \Omega^2, \\ M_y^{(1)}(t) < x < +\infty, t > 0, \Omega \in (-\infty < +\infty),$$

где B_{Ω} – Марковский коэффициент диффузии; a_i ($i = 1, 2$) – коэффициенты температуропроводности в областях, соответствующих условию нормировки:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P_i(x, t, \Omega) d\Omega = 1, t \geq 0, x \in (0, +\infty) \text{ и условиям на бесконечностях } P_i(x, t, \pm\infty) = 0.$$

Безусловно, классическая задача Стефана не может претендовать на описание быстропротекающих воздействий. Между медленно протекающим образованием льда при естественных природных явлениях и плавлением, когда на вещество производится кратковременное ударное тепловое воздействие, имеется различие. Хотя, отметим, даже в таком стохастическом варианте постановки классической задачи Стефана в работе [5] был выявлен эффект «странного» поведения дисперсии. Суть эффекта состоит в следующем. В начальный момент времени регулярная составляющая дисперсии равна нулю и до момента времени $t = 1/e$ ед. времени убывает, достигая минимума, равного $\min \operatorname{Re} g(1/e) = -B_{\Omega} / e$. Это означает, что на этом отрезке времени наблюдается сопротивление изменению формы фронта фазового перехода. Это явление мы назвали *эффектом стремления к сохранению первоначальной формы фронта фазового перехода*. После момента времени $t = 1/e$ ед. времени это сопротивление ослабевает и прекращается в момент времени $t = 1$ ед. времени, когда $\min \operatorname{Re} g(1) = 0$. После этого начинается фаза активного искажения формы фронта фазового перехода.

Этот, казалось бы незначительный, эффект, из-за малости Марковского коэффициента диффузии B_{Ω} и времени $t = 1/e$ ед. времени, может оказаться важным при тонких технологических процессах, когда требуется как можно дольше сохранить первоначально плоскую форму либо выращиваемого кристалла, либо плоской формы твердого тела при других тепловых воздействиях, не обязательно имеющих характер фазовых превращений, например при нанесении нанопокровов. Зная, как изменяется во времени дисперсия D_y , следует ступенчато вести технологический процесс, начиная от момента времени $t = 0$ до $t = 1/e$ ед. времени. Затем произвести остановку, потом снова начать, и периодически повторять эту процедуру много раз. При этом будут нивелированы ненужные случайные воздействия, которые способствуют искажению плоской формы твердого тела, подверженного внешним и внутренним случайным воздействиям.

В настоящей работе исследуется один из вариантов стохастической постановки для ПВ задачи стефановского типа.

Приведем следующую постановку задачи для ПВ. Пусть на вещество воздействует мощный тепловой импульс, когда его длительность $1/\alpha$ сравнима с временем тепловой релаксации τ_r . Пусть на неподвижную границу действует излучение мощностью теплового потока $q_0 \exp[-\alpha t]$, а на подвижной границе действует тепловой поток мощностью $q_1 \exp[-\alpha t]$, где $q_1 > q_0$. Стохастическая постановка задачи для ПВ о быстропротекающем процессе теплопроводности при импульсном воздействии мощного излучения на вещество имеет следующий вид:

$$\partial P(x, t, \Omega) / \partial t = -\partial(A_T(x, t, \Omega)P(x, t, \Omega)) / \partial \Omega + 0,5B_{\Omega} \partial^2 P(x, t, \Omega) / \partial \Omega^2, \quad (4) \\ 0 < x < M_y^{(1)}(t), t > 0, \Omega \in (-\infty < +\infty).$$

Здесь:

$$A_T(x, t, C) = \Omega P_T(x, t, \Omega)(a_1 \partial^2 M_T^{(1)}(x, t) / \partial x^2 - \tau_r \partial^2 M_T^{(1)}(x, t) / \partial t^2) / M_T^{(1)}(x, t). \quad (5)$$

$$P_T(0, t, \Omega) = \varphi_{T\text{Гран}}(t, \Omega), \quad \Omega \in (-\infty, +\infty), \quad 0 < t < +\infty. \quad (6)$$

$$\lambda \partial P_T(x, t, \Omega) / \partial x \Big|_{x=0} = q_0(t) \exp(-\alpha t) P(0, t, \Omega), \quad t > 0, \quad \Omega \in (-\infty, +\infty).$$

$$\begin{aligned} & -\lambda \partial P_T(x, t, \Omega) / \partial x \Big|_{x=M_y^{(1)}(t)} = \\ & = -\partial(\Omega L \rho (dM_y^{(1)}(t) / dt + \tau_r d^2 M_y^{(1)}(t) / dt^2 + \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & + q_1 \exp[-\alpha t]) P_T(M_y^{(1)}(t), t, \Omega) / M_T^{(1)}(M_y^{(1)}(t), t) / \partial \Omega + \\ & + 0,5 B_\Theta \partial^2 P_T(M_y^{(1)}(t), t, \Omega) / \partial \Omega^2, \quad x = M_y^{(1)}(t), \quad t > 0, \quad \Omega \in (-\infty; +\infty). \end{aligned}$$

$$P_T(x, 0, \Omega) = \varphi_{T\text{Нач}}(x, \Omega), \quad 0 \leq x \leq M_y^{(1)}(0), \quad \Omega \in (-\infty, +\infty). \quad (8)$$

$$\partial P_T(x, t, \Omega) / \partial t \Big|_{t=0} = 0, \quad t \geq 0, \quad \Omega \in (-\infty, +\infty). \quad (9)$$

$$M_y(0) = M_{y0} = \text{const}. \quad (10)$$

$$dM_y(t) / dt \Big|_{t=0} = \tilde{M}_{y0} = \text{const}. \quad (11)$$

Сравнительный анализ математических ожиданий гиперболической и параболической моделей задачи Стефана

Задача для математического ожидания, соответствующая задаче (4)–(11), имеет следующий вид [8]:

$$\tau_r \partial^2 M_T^{(1)}(x, t) / \partial t^2 + \partial M_T^{(1)}(x, t) / \partial x = a \partial^2 M_T^{(1)}(x, t) / \partial x^2, \quad (12)$$

$$0 < x < M_y^{(1)}(t), \quad t > 0.$$

$$M_T^{(1)}(0, t) = M_{T0}^{(1)}(0, t), \quad t > 0. \quad (13)$$

$$\lambda \partial M_T^{(1)}(0, t) / \partial x = q_0 \exp[-\alpha t], \quad t > 0. \quad (14)$$

$$-\lambda \partial M_T^{(1)}(M_y^{(1)}(t), t) / \partial x = \tau_r L \rho d^2 M_y^{(1)} / dt^2 + L \rho d M_y^{(1)} / dt + q_1 \exp[-\alpha t], \quad t > 0. \quad (15)$$

$$M_y^{(1)}(0) = M_{y0}^{(1)} = \text{const}. \quad (16)$$

$$dM_y^{(1)}(t) / dt \Big|_{t=0} = 0. \quad (17)$$

Уравнениям (12)–(17) удовлетворяют функции

$$M_T^{(1)}(x, t) = M_{T0}^{(1)}(0, t) + \quad (18)$$

$$+ q_0 \exp[-t / \tau_r] \sin(x \sqrt{\alpha(1 - \tau_r \alpha) / a}) / (\lambda \sqrt{\alpha(1 - \tau_r \alpha) / a}).$$

При $\alpha = 1 / \tau_r$ выражение (18) преобразуется к виду

$$M_T^{(1)}(x, t) = M_{T0}^{(1)}(0, t) + q_0 \exp[-t / \tau_r] x / \lambda. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (20), получим уравнение

$$\begin{aligned} & -\lambda \partial M_T^{(1)}(M_y^{(1)}(t), t) / \partial x = d^2 M_y^{(1)} / dt^2 + d M_y^{(1)} / dt = \\ & = -(1 / (\tau_r L \rho))(q_1 - q_0) \exp[-t / \tau_r], \quad t > 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Решение уравнения (20)

$$M_y^{(1)}(t) = M_{y0}^{(1)} - (q_1 - q_0) [1 - \exp[-t / \tau_r]] (t / \tau_r + 1) / (L \rho \tau_r). \quad (21)$$

Приведенные решения получены и описаны в работе [8]. Непосредственной подстановкой убедимся, что решения соответствующих задач для математических ожиданий $M_{TT}^{(1)}(t, x)$ и $M_{yy}^{(1)}(t)$, основанных на параболическом уравнении теплопроводности и классического закона Фурье, выглядят так:

$$M_{TT}^{(1)} = M_{TT0}^{(1)}(0, t) + q_0 \sqrt{a/\alpha} \exp[-\alpha t] \sin(x\sqrt{\alpha/a}) / \lambda. \quad (22)$$

$$M_{yy}^{(1)}(t) = M_{yy0}^{(1)} - 2\sqrt{a/\alpha} \operatorname{arctg}\{(\sqrt{q_1^2 - q_0^2} / (q_1 + q_0)) \times \operatorname{tg}[\sqrt{q_1^2 - q_0^2} / (2L\rho)(\sqrt{a\alpha})^{-1}(1 - \exp(-\alpha t))]\}. \quad (23)$$

Для сравнительного анализа решений с гиперболическим и параболическим вариантами исследуемой задачи Стефана необходимо преобразовать решения (22)–(23), когда $\alpha = 1/\tau_r$. Имеем:

$$M_{TT}^{(1)} = M_{TT0}^{(1)}(0, t) + q_0 \sqrt{a\tau_r} \exp[-t/\tau_r] \sin(x/\sqrt{a\tau_r}) / \lambda. \quad (24)$$

$$M_{yy}^{(1)}(t) = M_{yy0}^{(1)} - 2\sqrt{a\tau_r} \operatorname{arctg}\{(\sqrt{q_1^2 - q_0^2} / (q_1 + q_0)) \times \operatorname{tg}[\sqrt{q_1^2 - q_0^2} / (2L\rho)(\sqrt{\tau_r/a}(1 - \exp(-t/\tau_r)))]\}. \quad (25)$$

Графики для температурных зависимостей $M_T^{(1)}(x, t)$ и $M_{TT}^{(1)}(x, t)$ изображены на рис. 1 и рис. 2. Из этих рисунков следует, что не всегда решения задач для гиперболического и параболического уравнений носят одинаковый качественный характер. Если функция $M_{TT}^{(1)}(x, t)$ осциллирует с изменением x , то функция $M_T^{(1)}(x, t)$ строго монотонная. При тех значениях x , при которых синус в выражении (24) обращается в нуль, $M_{TT}^{(1)}(x, t)$ постоянная во времени, а $M_T^{(1)}(x, t)$ изменяется по закону экспоненты.

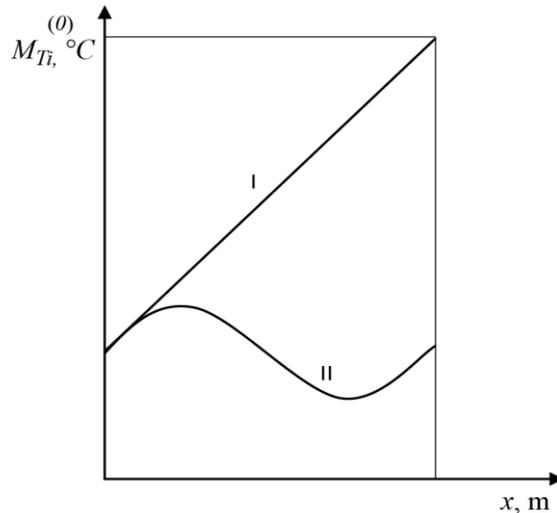


Рис.1. Зависимость температуры от пространственной координаты. $i=1$ -параболическая модель; $i=2$ — гиперболическая модель.

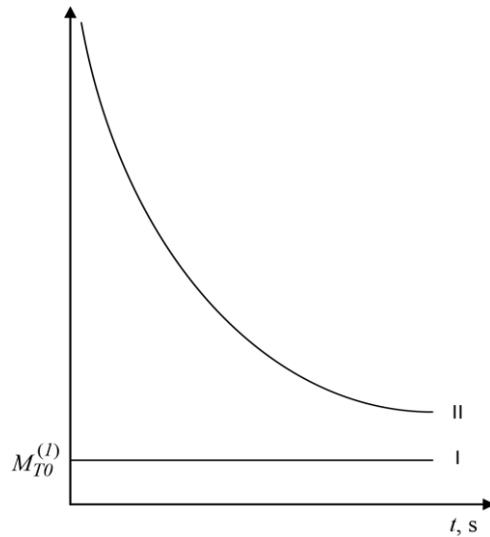


Рис.2. Зависимость температуры от времени. $i = 1$ параболическая модель; $i = 2$ гиперболическая модель.

На рис. 3 и 4 изображено поведение законов движения фронта фазового перехода $M_y^{(1)}(t)$ и $M_{yy}^{(1)}(t)$,

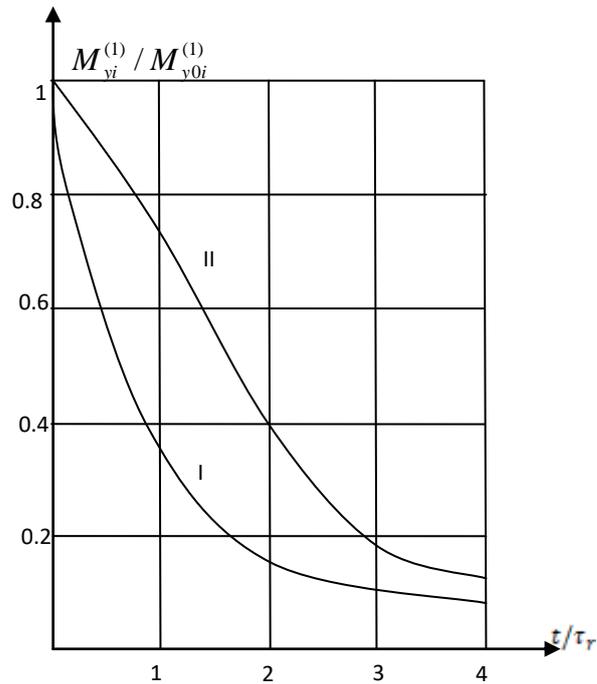


Рис. 3. Изменение положения границы раздела фаз в зависимости от времени. $i = 1$ — параболическая модель; $i = 2$ — гиперболическая модель. $\tau_r = 10^{-9} c$; $q_0 = 10^{-2} q_i$; $a = 10^{-5} m^2 / c$.

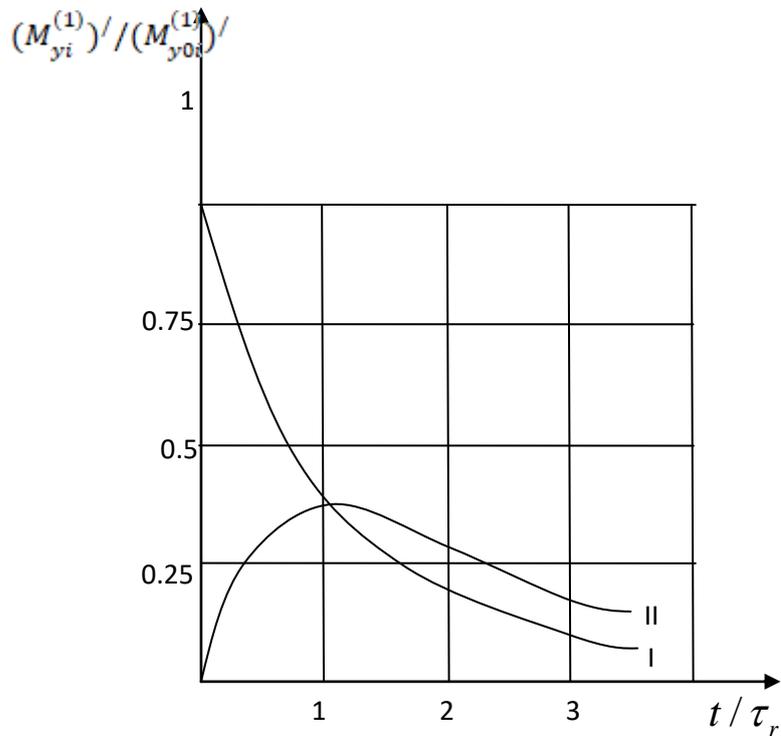


Рис. 4. Зависимость скорости перемещения границы раздела фаз от времени. $i = 1$ — параболическая модель; $i = 2$ — гиперболическая модель.

а на рис. 5 и 6 – скоростей $dM_y^{(1)}(t)/dt$ и $dM_{yy}^{(1)}(t)/dt$. Модель с параболическим уравнением предсказывает, что процесс фазового перехода начинается с максимальной скорости, которая, отметим, может быть сколь угодно велика в зависимости от соотношения q_0 и q_1 . Согласно гиперболической модели, фронт фазового перехода ускоряется от нулевой скорости до максимальной не мгновенно, а в течение некоторого времени, определяемого величиной τ_r . Максимальное значение $dM_y^{(1)}(t)/dt$ ограничено сверху постоянной $\sqrt{a/\tau_r}$. С помощью соотношений (27)–(29) можем установить связь между температурой на фронте $M_T^{(1)}(M_y^{(1)}(t), t)$ и кинематическими характеристиками фронта $dM_y^{(1)}(t)/dt$ и $d^2M_y^{(1)}(t)/dt^2$. Имеем для гиперболической модели

$$M_T^{(1)}(M_y^{(1)}(t), t) = M_{T0}^{(1)} + [(q_0 L \rho) / (\lambda (q_1 - q_0))] [\tau_r L \rho d^2 M_y / dt^2 + dM_y / dt] M_y. \quad (26)$$

В модели с параболическим уравнением получается такое соотношение:

$$M_{yy}^{(1)}(t, t) = (M_{T0}^{(1)} - (L \rho a) / \lambda) - a \tau_r L \rho d (\ln(M_{yy}^{(1)}) / dt) / \lambda. \quad (27)$$

Сравнительный анализ дисперсий параболической и гиперболической моделей задачи Стефана

Вывод уравнений для ПВ и дисперсии, соответствующих стефановским задачам, ничем не отличается от тех, которые предложены в работе [9]. Здесь приведем постановку задачи для дисперсии, соответствующей гиперболической модели исследуемой задачи Стефана (20)–(25). Это решение имеет следующий вид:

$$\partial D_T(x,t) / \partial t = [(2a\partial^2 M_T^{(1)}(x,t) / \partial x^2 - 2\tau_r \partial^2 M_T^{(1)}(x,t)) / M_T^{(1)}(x,t)] D_T(x,t) + B_\Omega, \quad (28)$$

$t > 0, x \in (0, M_y^{(1)}(t)).$

$$D_T(x,0) = D_{Tнач}(x) = \delta_0^2(x)(M_{Tнач}^{(1)})^2, \quad x \in [0, M_y^{(1)}(0)].$$

Дисперсия фронта фазового перехода описывается следующими уравнениями:

$$\partial D_y(x,t) / \partial t = [(2a\partial^2 M_{T2}^{(1)}(x,t) / \partial x^2) / M_{T2}^{(1)}(x,t)] D_{T2}(x,t) + B_\Theta, \quad t > 0, x \in (M_y^{(1)}(t), +\infty). \quad (29)$$

$$D_T(x,0) = D_{Tнач}(x) = \delta_0^2(x)(M_{Tнач}^{(1)})^2, \quad x \in [M_y^{(1)}(0), +\infty). \quad (30)$$

С учетом того, что справедливы уравнения (12)–(17), уравнения (20)–(22) можно переписать, заменив правые части на левые:

$$\partial D_T(x,t) / \partial t = [\partial \ln(M_T^{(1)}(x,t))^2 / \partial t] D_T(x,t) + B_\Omega, \quad t > 0, x \in (0, M_y^{(1)}(t)).$$

Отсюда получаем решения задач для дисперсий в виде:

$$D_T(x,t) = [\int_0^t B_\Omega d\xi / (M_T^{(1)}(x,\xi))^2 + \delta_0^2(x)] (M_T^{(1)}(x,t))^2, \quad x \in (0, M_y^{(1)}(t)], \quad t \geq 0. \quad (31)$$

$$D_y(t) = [\int_0^t B_\Theta dx / (M_y^{(1)}(x))^2 + \delta_0^2] (M_y^{(1)}(t))^2, \quad t \in [0, 10], \quad (32)$$

Для параболической модели имеем:

$$D_{yy}(t) = [\int_0^t B_\Theta dx / (M_{yy}^{(1)}(x))^2 + \delta_0^2] (M_{yy}^{(1)}(t))^2, \quad t \in [0, 10], \quad \text{где}$$

$$M_{yy}^{(1)}(t) = M_{yy0}^{(1)} - 2\sqrt{a\tau_r} \arctg\{(\sqrt{q_1^2 - q_0^2} / (q_1 + q_0)) \times$$

$$\times \text{tg}[\sqrt{\tau_r / a} \cdot \sqrt{q_1^2 - q_0^2} \cdot (1 - \exp(-t) / (2L\rho))]\}. \quad (33)$$

Поскольку температурный режим при случайных воздействиях на вещество неустойчив, представляет интерес исследовать искажение фронта фазового перехода. Это важно еще и потому, что сильно разнятся начальные моменты скоростей движения этого фронта в рассматриваемых моделях.

Так получается, что интегралы $\int_0^t B_\Theta dx / (M_y^{(1)}(x))^2$ и $\int_0^t B_\Theta dx / (M_{yy}^{(1)}(x))^2$ не берутся в квадратурах, поэтому предлагается находить их численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности как решение следующей задачи Коши:

$$dz / dt = 1 / (M_y^{(1)}(t))^2, \quad M_y^{(1)}(0) = 0. \quad (34)$$

Приведем данные для расчетов некоторого материала. Плотность $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг / м³. Теплота фазового перехода $L = 1,0449 \cdot 10^7$ Дж / кг. Коэффициент теплопроводности $\lambda = 62$ Вт / (м · град). Коэффициент температуропроводности $a = 25,8 \cdot 10^{-6}$ м² / с. Время тепловой релаксации $\tau_r = 10^{-9}$ с. Начальная (максимальная) плотность падающего потока на подвижную границу $q_1 = 10^{11}$ Вт / м². Начальная (максимальная) плотность падающего потока на неподвижную границу $q_0 = 10^9$ Вт / м². Начальное положение фронта фазового перехода для гиперболической модели $M_{y0}^{(1)}(0) = 1$ м. Начальное положение фронта фазового перехода для параболической модели $M_{yy0}^{(1)}(0) = 1$ м. Начальная температура для гиперболической модели $M_{T0}^{(1)}(x,0) = 20^\circ\text{C}$. Начальная температура для параболической модели $M_{TT0}^{(1)}(x,0) = 20^\circ\text{C}$. Время импульса $1/\alpha = \tau_r$ с. Что касается Марковских коэффициентов диффузии, то их

значения не представлены ни в одном справочном издании. В настоящей работе предлагается считать их одного порядка с коэффициентом температуропроводности $B_{\Theta} = 10^{-4}$, $B_{\Omega} = 10^{-4}$.

Результаты расчетов показаны на рис. 5 и 6.

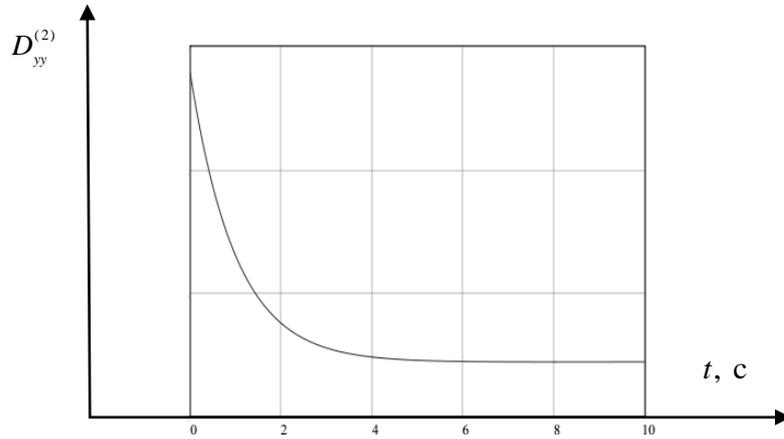


Рис. 5. Временное поведение дисперсии фронта фазового перехода для параболической модели

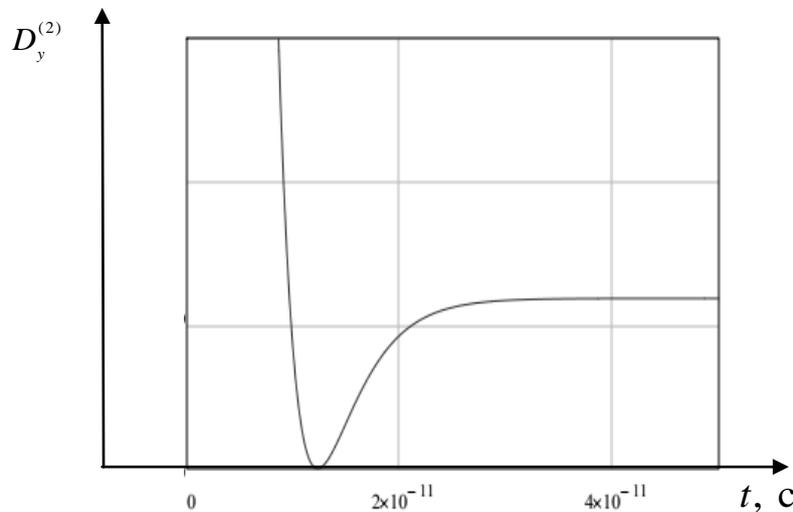


Рис. 6. Временное поведение дисперсии фронта фазового перехода для гиперболической модели

Обсудим результаты временного поведения дисперсии на фронте фазового перехода. Как и в случае стохастического рассмотрения задачи Стефана, проведенного в работе [5], здесь также наблюдается эффект стремления к сохранению первоначальной формы фронта фазового перехода. Как интерпретировать практическое применение этого явления для быстропротекающего процесса теплопроводности? Ведь время релаксации очень мало, можно ли извлечь пользу от выявления времени наступления наименьшего значения дисперсии, когда искажение формы фронта фазового перехода минимальное? Попробуем ответить на этот вопрос. Несмотря на то, что здесь рассматривается задача в плоской постановке, возможно провести аналогичный количественный и качественный анализ и для сферической первоначальной формы частицы. Исходя из фиксации момента наименьшей

дисперсии, можно рассчитать время импульсного воздействия, при котором наблюдается наименьшее искажение формы фронта фазового перехода, и в результате планирования эксперимента получить требуемую, возможно близкую к первоначальной, конфигурацию расплавленной частицы после ее остывания.

Заключение

В настоящее время накоплен большой математический аппарат, который детерминистическим образом описывает многие явления физической природы. Этот аппарат требует его перевода, образно говоря, на «стохастический язык». В частности, в работе [2] одного из авторов этой статьи Э.М. Карташова получены многочисленные аналитические решения оригинальных детерминированных задач по теплофизике, термоупругости и др., которые уже успешно используются на практике. В недавних работах авторов настоящей статьи продемонстрированы возможности соединения классических детерминированных представлений о физических явлениях со стохастическими. Могут быть открыты новые эффекты, помимо описанных условий устойчивости по дисперсии и экстремальных свойств дисперсии. Особую важность приобретает практическое применение результатов стохастических исследований законов движения фронта фазового перехода к проведению технологических процессов. Это, прежде всего, касается определения времени плавления и испарения микрочастиц при мощном воздействии импульсного лазерного излучения на вещество.

Литература

1. Stefan J. Under probleme derteorie der warmeleitung// Sietzber.Wien. Akad. Mat. Naturw. 1889. Bd. 98. 11a. P. 616–634.
2. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001. 540 с.
3. Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости. Самара: Издательство СГТУ. 2010. 652 с.
4. Карташов Э.М., Соловьев И.А. Стохастический подход к проблеме Стефана. Известия РАН. Энергетика. 2017. №5. С 134–143./
5. Соловьев И.А, Доличанин-Декич Д.Ч. Стохастические модели. М., 2014. С. 134.
6. Zhirnov I. D.V. D.V.Kotoban , A.V. Gusarov. Evaporation-induced gas-phase flows at selective laser melting. International Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 113, October 2017. P. 975–983.
7. Huaxia YAO. Long-Term Study of Lake Evaporation and Evaluation of Seven Estimation Methods: Results from Dickie Lake, South-Central Ontario, Canada. Earth & Environmental Sciences. Vol.1 No.2, August, 2009, PP. 59–77.
8. C. Meier, R.W. Penny, Y. Zou, J.S. Gibbs, A.J. Hart, Thermophysical phenomena in metal additive manufacturing by selective laser melting: Fundamentals, modeling, simulation and experimentation. arXiv:1709.09510v1 [physics.app-ph] 4 Sep 2017.
9. M.J. Matthews, G. Guss, S.A. Khairallah, A. Rubenchik, A.T. Anderson, P.J. Depond, W.E. King, Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes. Acta Mater. 114, 2016. P. 33–42.
10. Roscani S., Marcus E.S. Two equivalent Stefan's problems for the time fractional diffusion equation. Fractional Calculus and Applied Analysis. 2013. Т. 16. № 4. С. 802–815.

Авторы публикации

Карташов Эдуард Михайлович – докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры высшей и прикладной математики Московского технологического университета (МИТХТ). E-mail: kartashov@mitht.ru.

Соловьев Игорь Алексеевич – д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры высшей математики и физики Государственного университета по землеустройству. E-mail: igorsoloviev@inbox.ru.

References

1. J. Stefan. Under probleme derteorie der warmeleitung// Sietzber.Wien. Akad. Mat. Naturw. 1889. Bd. 98. 11a. P. 616–634.
2. Kartashov E.M. Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids. M.: Higher school, 2001. 540
3. S. Kartashov, E. M., Kudinov, V. A., Analytical theory of heat conductivity and thermoelasticity applied. Samara: Publishing house SGTU. 2010. 652 p.
4. Kartashov E.M., Solovyev I.A. Stochastic approach to the problem of Stefan. News of wounds. Energy. 2017. No. 5. From 134–143.
5. I. Solovyev, H.D Dolicanin-Jekic. Stochastic model. M.: 2014. P. 134.
6. Zhirnov I. D.V. D.V.Kotoban , A.V. Gusarov. Evaporation-induced gas-phase flows at selective laser melting. International Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 113, October 2017. P. 975–983.
7. Huaxia YAO. Long-Term Study of Lake Evaporation and Evaluation of Seven Estimation Methods: Results from Dickie Lake, South-Central Ontario, Canada. Earth & Environmental Sciences. Vol.1 No.2, August, 2009, PP. 59–77.
8. C. Meier, R.W. Penny, Y. Zou, J.S. Gibbs, A.J. Hart, Thermophysical phenomena in metal additive manufacturing by selective laser melting: Fundamentals, modeling, simulation and experimentation. arXiv:1709.09510v1 [physics.app-ph] 4 Sep 2017.
9. M.J. Matthews, G. Guss, S.A. Khairallah, A. Rubenchik, A.T. Anderson, P.J. Depond, W.E. King, Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes. Acta Mater. 114, 2016. P. 33–42.
10. S. Roscani, E.S. Marcus Two equivalent Stefan's problems for the time fractional diffusion equation. Fractional Calculus and Applied Analysis. 2013. T. 16. № 4. C. 802–815.

Authors of the publication

Eduard M. Kartashov – State Tehnological University (MITHT), Moscow, Russia. E-mail: kartashov@mitht.ru.

Igor A. Solovyev – State University of Land Management, Moscow, Russia. E-mail: igorsoloviev@inbox.ru.

Поступила в редакцию

12 декабря 2018 г.