

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА

ЮДИЦКИЙ Д.М., УСАЧЕВ А.Е. Сравнительная оценка доли ударов молний в опоры и верхний фазный провод в пролете ВЛ без молниезащитного троса.	3
ГОЛУБЦОВ Н.В., ФЕДОРОВ О.В. Эффективное управление пусконаладочными процессами на электростанции с использованием ранжирования работ.	11
ХРУСТАЛЕВ В.А., СУЧКОВ В.М. Внепиковое опреснение воды на базе отборного пара энергоблоков АЭС с ВВЭР.	23
БАХТЕЕВ К.Р. Создание гибридного накопителя электроэнергии большой мощности для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения промышленных потребителей.	36

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

БРОДОВ Ю.М., ЖИЛКИН Б.П., КОЧЕВ Н.С., ПЛОТНИКОВ Л.В. Повышение надежности поршневых двигателей за счет совершенствования процесса смесеобразования.	45
ШВЕЦОВ В.Н., ЮНУСОВ А.А. Новая энергоэффективная технология и техника электродеэмульсации нефти на основе применения композитных электродов.	54

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ГРАЧЕВА Е.И., ИЛЬЯСОВ И.И., АЛИМОВА А.Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения энергетических предприятий.	62
БАЙБАГЫСОВА Д.Ж., КАДИЕВА А.К., КАДЫРОВ ЧА., УЗАГАЛИВ ЗА. Компьютерное моделирование процесса нагрева и определение расчетной нагрузки проводника при стохастическом характере изменения тока.	72
ДМИТРИЕВ В.Н., КИСЛИЦЫН А.Л., ДУНАЕВ Д.И. Исследование тормозных режимов асинхронного дебалансного двигателя.	82
СИДОРОВ С.Н., ГОРБАЧЕВСКИЙ Н.И., ГАВРИЛОВ Е.Н. Многодвигательный частотно-регулируемый электропривод линии обрезающего корда.	89

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В., ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ В.А., ИВАНОВ Д.А., МАРДАНОВ Г.Д. Дистанционный контроль технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов.	99
КУБАРЕВ А.Ю., ЗАКИРОВА А.Б., КУБАРЕВ Ю.Г. Методы исследования свойств дефектного электрооборудования.	108
КИСЕЛЕВ В.Г., РУЗИЧ Е.Н., ЧУНГ Ч.В. Оптимизация объема использования коксовой засыпки в системах катодной защиты для модели анодного заземления в форме полусферы.	116
ИВАНИЦКИЙ М.С. Статистическое моделирование распределения концентрации твердых частиц в атмосфере района расположения котельной, сжигающей непроектное топливо.	129

ФИЗИКА

КУЗНЕЦОВ Г.В., НУРПЕЙИС А.Е. Экспериментальное определение температур в характерных сечениях рабочей зоны замкнутого двухфазного тьермосифона.	136
САЙФУЛЛИН Э.Р., НАЗАРЫЧЕВ С.А., ГАЗЕЙКИНА А.В., ВАНЬКОВ Ю.В., ЛАРИОНОВА И.В. Анализ теплотехнических характеристик углеводородного топлива при изменении его состава.	145

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

YUDITSKIY D.M., USACHEV A.E. Comparative estimate of the proportion of lightning strikes in the towers and the upper phase wire in the span of the overhead power lines without ground wire.	3
GOLUBTSOV N.V., FEDOROV O.V. Effective management of the start-up and adjustment at the power station by ranking tasks.	11
KHRUSTALEV V.A., SUCHKOV V.M. Off-peak water dispersal based on steam selecting of npp energy blocks with PWR.	23
BAKHTEYEV K.R. Creation of a big power hybrid electric energy storage for prevention short-term interruption of power supply to industrial consumers.	36

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL ENGINEERING

BRODOV YU.M., ZHILKIN B.P. Increasing the reliability of piston engines by the improvement of the mixing process.	45
SHVETSOV V.N., YUNUSOV A.A. Innovative energi-efficient technology and technique for oil electrical deemulsification on basis of composite electrodes usage.	54

ELECTRICAL ENGINEERING

GRACHEVA E.I., ILIASOV I.I., ALIMOVA A.N. 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.	62
BAYBAGYSOVA D.ZH., KADIYEVA A.K., KADYROV CHA., UZAGALIV Z.A. Computer simulation of the heating process and the determination of the calculated load of the conductor under stochastic character of current change.	72
DMITRIYEV V.N., KISLITSYN A.L., DUNAYEV D.I. Research of braking modes of asynchronous vibration motor debelyanovo.	82
SIDOROV S.N., GORBACHEVSKIY N.I., GAVRILOV E.N. Multivulated frequency-regulated electric drive of cord wrapping line.	89

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

GOLENISHCHEV-KUTUZOV A.V., GOLENISHCHEV-KUTUZOV V.A., IVANOV D.A., MARDANOV G.D. Remote control of the technical condition of porcelain high voltage insulators.	99
KUBAREV A.YU., ZAKIROVA A.B., KUBAREV YU.G. Research methods of the properties of defective electrical equipment.	108
KISELEV V.G., RUZICH E.N., CHUNG CH.V. Optimization of the amount of coke filling usage in cathodic protection systems for an anode grounding model in the form of a hemisphere.	116
IVANITSKIY M.S. Statistical modeling of distribution of concentration of solid particles in the atmosphere district location boiler, combusting non-project fuel.	129

PHYSICS

KUZNETSOV G.V., NURPEYIS A.E. Experimental determination of temperatures in characteristic sections of the working zone of a closed two-phase thermosyphon.	136
SAYFULLIN E.R., NAZARYCHEV S.A., GAZEYKINA A.V., VANKOV YU.V., LARIONOVA I.V. Analysis of thermotechnical characteristics of hydrocarbon fuel variable composition.	145

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.13: 621.316.98: 621.316.932

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЛИ УДАРОВ МОЛНИЙ В ОПОРЫ И ВЕРХНИЙ ФАЗНЫЙ ПРОВОД В ПРОЛЁТЕ ВЛ БЕЗ МОЛНИЕЗАЩИТНОГО ТРОСА

Д.М. Юдицкий¹, А.Е. Усачев²

¹ООО «НПК «Силеста», г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: В статье проводится анализ относительной доли ударов молний в опоры и верхний фазный провод пролёта воздушной линии электропередачи без молниезащитного троса, выполненный в соответствии с различными действующими в Российской Федерации нормативными документами по молниезащите. Показываются существенные различия результатов оценок по разным методикам.

Ключевые слова: молниезащита, удар молнии, зона защиты, доля ударов, ВЛ, обратное перекрытие.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-3-10

COMPARATIVE ESTIMATE OF THE PROPORTION OF LIGHTNING STRIKES IN THE TOWERS AND THE UPPER PHASE WIRE IN THE SPAN OF THE OVERHEAD POWER LINES WITHOUT GROUND WIRE

D.M. Yuditsky¹, A.E. Usachev²

ООО NPK Silesta

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: In the article the analysis of the proportion of lightning strikes in the towers and the upper phase wire of the span of overhead transmission lines without ground wire, made in accordance with different applicable in the Russian Federation, regulatory documents of lightning. Built zone protection of the towers on transmission lines without ground wire depending on the span length and the height of the towers. Seem significant differences of the results of assessments by different techniques. The results of the builds were revealed the need to refine existing methods to determine the fraction of lightning strikes in the towers and phase wirles.

Keywords: lightning protection, lightning strike, area protection, the share of strike, power lines, reverses overlap

Проблема устойчивости воздушных линий электропередачи (ВЛ) высокого напряжения к атмосферным воздействиям остается одной из самых обсуждаемых. Как в Российской Федерации (РФ), так и за рубежом ей посвящено большое количество научных работ, а для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей и нормирования

показателей грозоупорности введен в действие целый ряд как отраслевых, так и федеральных норм и стандартов [2; 6–8; 12; 13].

Ряд нормативных документов, используемых в настоящее время, были выпущены более 15 лет назад, а некоторые и вовсе более 20, а переизданные нормы, как правило, не отличаются в принципиальных подходах к системе молниезащиты от тех, что указаны в более ранних изданиях. Таким образом, регулярно возникают вопросы о необходимости пересмотра и переработки действующих норм [1; 3; 10; 13].

В свою очередь, вопросы технической стороны решения проблемы также не стоят на месте – разрабатываются и внедряются в промышленную эксплуатацию новые и более совершенные устройства [4; 5], развиваются и испытываются существующие меры по снижению числа грозových отключений [9].

Грозоупорность воздушных линий электропередач (ВЛЭП) определяется как число отключений ВЛЭП вследствие их поражения ударами молний в течение года. Число таких отключений пропорционально грозовой активности атмосферы (число ударов молний в 1 квадратный километр поверхности за год) и эквивалентной площади ВЛЭП, под которой понимается площадь земной поверхности, число ударов молний в которую равно числу ударов в ВЛЭП. Эквивалентная площадь ВЛЭП (площадь или зона сбора молний ВЛЭП) зависит от длины линии, степени неравномерности высоты между проводниками ВЛЭП и землёй в пролётах между опорами (стрелы провиса провода), числа и высоты опор, наличия или отсутствия молниезащитного троса, расположения траверс и длин подвесных гирлянд изоляторов. Вероятность возникновения однофазного замыкания на землю или межфазного замыкания после удара молнии, а следовательно и вероятность отключения линии устройствами релейной защиты, зависят от класса напряжения ВЛЭП и места удара молнии. В отсутствие молниезащитного троса для ВЛЭП с номинальным напряжением 110 кВ и выше выделяют два таких места ударов молний: в опору и фазный провод. Вероятность отключения ВЛЭП при ударах в опору и фазный провод существенно различается. Для оценки грозоупорности ВЛЭП следует знать соотношение между долей ударов молний в опоры и фазные провода. Для линий без тросовой защиты эти оценки существенно различаются. Так по методике [7] это соотношение принимается равным 0,5, т.е. число ударов в опоры и фазные провода считается равным и не зависит от длины пролёта. Это положение входит в противоречие с другим действующим документом по молниезащите [8], следуя которому опоры можно рассматривать как молниеотвод, а фазные провода в пролёте как объект защиты. В этом случае доля ударов в опоры и фазный провод существенно зависит от длины пролёта. Принятый в 2010 году новый ГОСТ по молниезащите [2] слабо связан с первыми двумя нормативными документами. На его основе можно получить другие соотношения между вероятностью попадания молний в опоры и фазные провода ВЛЭП. В работе приводятся результаты расчётов долей ударов молний в опоры и верхний фазный провод пролёта по комбинированной методике, основанной на сочетании нормативных документов [2] и [8], а также приводится сопоставление с результатами применения методики [7] и метода катящейся сферы, принятого в качестве нормативного в большинстве стран мира.

На рис.1 изображены эквивалентные площади двух опор и верхнего фазного провода, при различных соотношениях между высотами опор и расстоянием между ними, и зоны защиты опор на высоте подвеса фазного провода с вероятностью защиты $P=0,9$ [8]. Эквивалентная площадь опор (зона сбора молний опорой) вычисляется как эквивалентная площадь одиночного молниеотвода и равна площади круга с радиусом, равным тройной высоте опоры [2]:

$$S_1 = 0,5 \cdot \pi \cdot (3 \cdot H_1)^2; \quad S_2 = 0,5 \cdot \pi \cdot (3 \cdot H_2)^2; \quad S_{\text{оп}} = S_1 + S_2, \quad (1)$$

где H_1 и H_2 – высоты левой и правой опор ВЛ; $S_{\text{оп}}$ – общая площадь сбора опор для вычисления числа ударов молнии в опоры. Множитель 0,5 в (1) появляется из-за того, что

на ВЛЭП опора относится к двум пролётам и только половина площади должна учитываться при расчёте ударов в данный пролёт.

Эквивалентная площадь фазного провода пролёта (зона сбора молний на фазный провод) может быть вычислена умножением длины пролёта на ушестерённую среднюю высоту подвеса провода (H_{cp}). Хотя высота провода над землёй различна в различных частях пролёта, различия значений эквивалентной площади, полученные при интегрировании по изменяющейся высоте и по средней высоте, не превышают нескольких процентов. С достаточной точностью можно считать, что фазный провод имеет в пролёте одинаковую среднюю высоту [5–8]. Тогда эквивалентная площадь фазного провода в пролёте будет равна:

$$S_{пр} = 6 \cdot H_{cp} \cdot L. \quad (2)$$

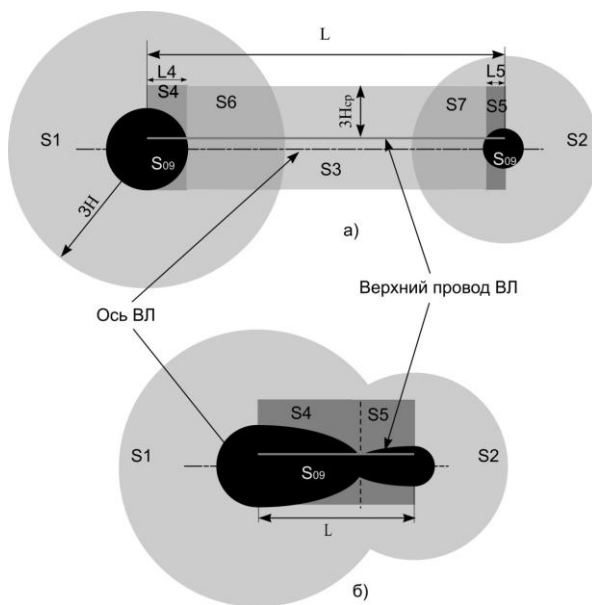


Рис. 1. Области защиты пролёта ВЛ при различных расстояниях (L) между опорами L :
а) $L > L_{\max}$; б) $L_{\max} < L < L_{\min}$

Как видно на рис. 1, эквивалентные площади опор и фазного провода пересекаются друг с другом, образуя ряд зон. Провод, расположенный между двумя опорами, можно рассматривать как объект защиты молниеотводами [2; 8; 13], которыми можно считать опоры соответствующего пролёта ВЛ. Для пролёта можно использовать формулы расчёта зон парных молниеотводов [8]. Зоны защиты фазного провода с вероятностью защиты 0,9 показаны на рис. 1 чёрным цветом и обозначены символом S_{09} . Участки эквивалентной площади провода длиной L_4 и L_5 , обозначенные символами S_4 и S_5 , соответствуют отрезкам фазового провода, защищённого опорой, с вероятностью защиты $P = 0,9$. С вероятностью $1-P$ молния может поразить фазный провод. Участки S_6 и S_7 одновременно принадлежат как эквивалентным площадям опор S_1 и S_2 , так и зоне провода. В этом случае, в соответствии с ГОСТ [2], общее число ударов молний в опоры и провод, равное произведению среднего числа ударов молний в единицу площади на суммарную площадь $S_6 + S_7$, следует поровну разделить между ударами в опоры и провод, т.е. половины эквивалентной площади этих участков следует относить к опорам, а другую половину к фазному проводу. Площадь S_3 целиком относится к эквивалентной зоне провода. При уменьшении длины пролёта зоны S_3 , S_6 и S_7 уменьшаются и при некоторой длине пролёта в промежутке $L_{\max} < L < L_{\min}$ исчезают

(рис. 1,б). Весь провод оказывается в зоне защиты опор. Чтобы определить число ударов молний в фазный провод в этом случае эквивалентную площадь провода $(S_4 + S_5)$ следует умножить на число ударов молний в единицу площади и умножить на $1-P$. Часто при расчётах грозоупорности считают, что грозовая активность атмосферы по всей длине трассы ВЛЭП одинакова и рассчитывать нужно только эквивалентные площади, показанные на рис. 1. Если имеются данные о различии грозовой активности вдоль трассы ВЛЭП, то эти данные можно подставить в расчёт грозоупорности соответствующего пролёта [10]. Сложность расчёта числа ударов молний в опоры пролёта и в фазный провод при учёте реальной длины пролётов на ВЛЭП состоит в том, что внутренний угол защиты, с помощью которого вычисляются площади (зоны) S_3, S_4, S_5, S_6 и S_7 , зависит нелинейно от расстояния между опорами [8]. В расчётах доли ударов в опоры и фазный провод использовались следующие формулы определения эквивалентных площадей опор и провода:

$$S_{\text{оп}} = 0,5 \times (S_1 + S_2) - (S_4 + S_5) \times (1-P) - 0,5 \times (S_6 + S_7); \quad (3)$$

$$S_{\text{пр}} = S_3 + 0,5 \times (S_6 + S_7) + (S_4 + S_5) \times (1-P). \quad (4)$$

Вероятность удара молнии в опоры пролёта при ударе молнии в пролёт (доля ударов в опоры) определится соотношением между соответствующими площадями:

$$P_{\text{оп}} = \frac{S_{\text{оп}}}{S_{\text{оп}} + S_{\text{пр}}} \frac{1}{2}. \quad (5)$$

В случае рис. 1, б вероятность ударов молнии в опоры, в соответствии с [2; 9], будет равна P для этого и меньшего расстояния между опорами.

При больших расстояниях между опорами, когда минимальная высота защитной зоны парного молниеотвода меньше высоты подвеса провода, не весь провод попадает в зону защиты опор.

При вычислении длины защищённых участков L_4 и L_5 учитывалось, что фазный провод расположен не на оси ВЛ, а смещён от неё на длину верхней траверсы. Проекция защитной зоны опор на горизонтальную плоскость, рассчитываемая как для парного молниеотвода, на высоте расположения фазного провода представляет собой эллипс с полуосями различной длины. Длина перпендикулярной к трассе ВЛ полуоси эллипса рассчитывается по РД [8] как для одиночного молниеотвода. Длина продольной к трассе ВЛ полуоси эллипса рассчитывается [8] как для парного молниеотвода с соответствующим внутренним углом защиты.

Если опоры имеют разную высоту или одна из опор является анкерной, то высота подвеса провода будет зависеть от расстояния между опорами, стрелы провеса провода и разницы высот подвеса провода на опорах пролёта.

Различные варианты соотношения радиусов опор и расстояния между опорами показаны на рис. 2.

На рис. 2 использованы следующие обозначения: L – длина пролёта ВЛЭП; $R_1 = 3H_1$ и $R_2 = 3H_2$ – радиусы эквивалентных площадей опор; x_1 и x_2 – координаты по оси x точек пересечения границ эквивалентных площадей опор, получаемых по выражению (1), и границы эквивалентной площади ВЛЭП; x_{12} – координата x точек пересечения границ эквивалентных площадей опор. В зависимости от значения координат x_1, x_{12} и x_2 и длины пролёта L возможно семь различных вариантов расчёта площадей рис. 1. Так на рис. 2,а эквивалентные площади левой и правой опор не пересекаются, а часть площади провода ВЛ не входит в зону сбора молний на опоры. Согласно ГОСТ [2] эту часть площади ВЛ можно в расчётах числа ударов принимать с множителем 1. Площади ВЛ, входящие в площадь правой и левой опор, должны учитываться с множителем 0,5. С таким же множителем эти площади должны учитываться при расчёте числа ударов в соответствующую опору.

На рис. 2,б почти вся площадь ВЛ, за исключением небольшой части, входит в зону сбора опор. Появляется участок ВЛ, входящий одновременно в площадь правой и левой

опор. Эта площадка входит одновременно в три зоны сбора и в каждой из них должна учитываться с множителем 1/3.

На рис. 2,а вся площадь ВЛ попадает в зону опор, а зона ВЛ, совпадающая с зонами одновременно двух опор, растёт.

На рис. 2,б и 2,в зона левой опоры заходит на площадь соседнего пролёта.

На рис. 2,г зона правой опоры также захватывает зону предыдущего пролёта, а на рис. 2,д и 2,е вся зона пролёта ВЛ входит в зоны обоих опор и должна учитываться с вероятностью 1/3.

В данном рассмотрении не показаны зоны защиты провода опорами, приведённые на рис. 1.

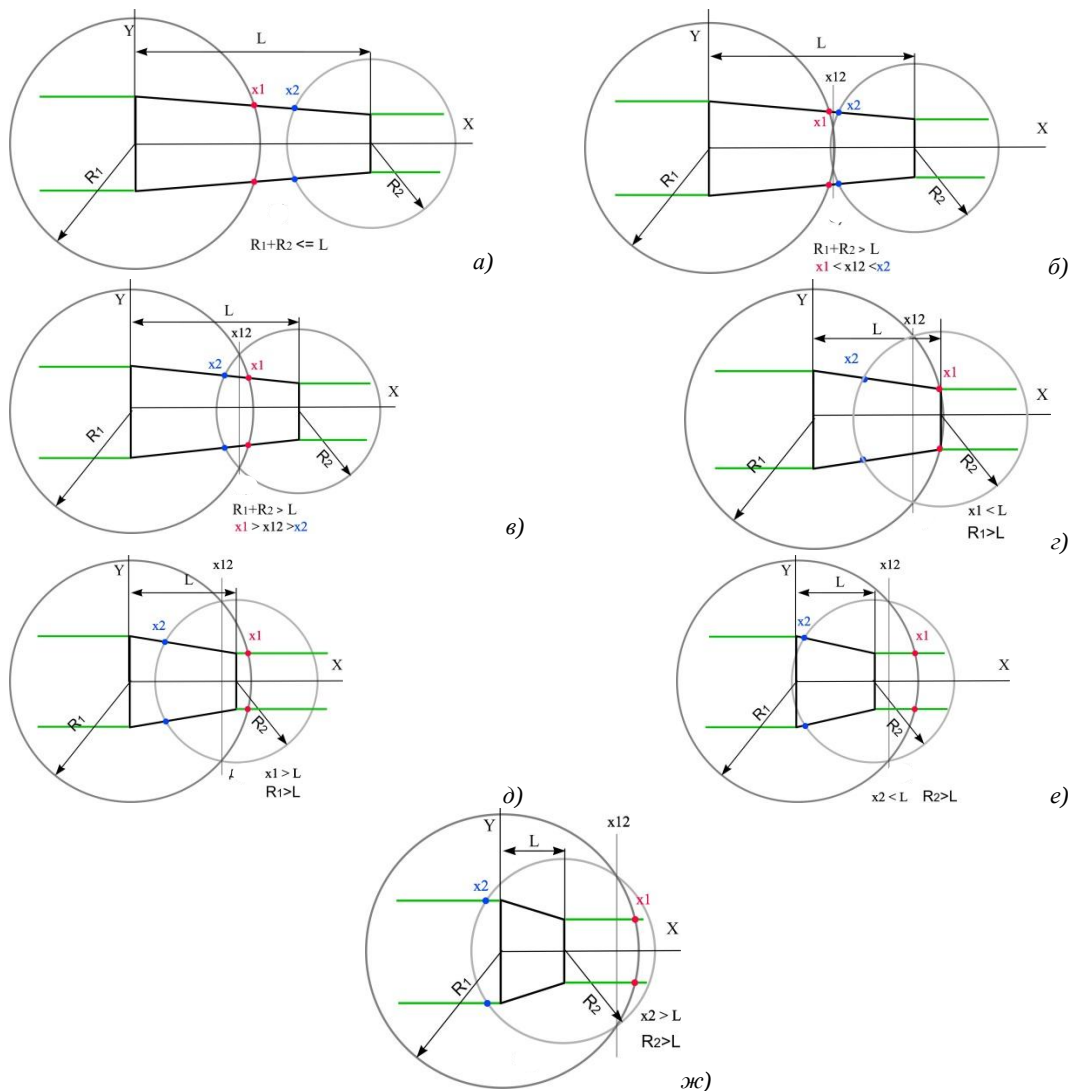


Рис. 2. Эквивалентные площади опор и фазного провода для расчёта числа ударов молний в пролёт ВЛЭП: S опор (круги) и S провод ВЛ (черная трапеция и линии соседних пролётов) при различных расстояниях между опорами

В большинстве случаев на ВЛ реализуются случаи, показанные на рис. 2,а и 2,б. Однако вблизи подстанций реализуются ситуации даже типа рис. 2,ж.

Результаты расчёта доли ударов молний в опоры по вышеописанной методике, основанной на [2; 8], показаны на рис. 3 (кривая 2). Для сравнения на рис. 3 представлены зависимости доли ударов молнии в опоры пролёта от длины пролёта, рассчитанные электро-геометрическим методом [13] (кривая 1) и по РД [7] (прямая 3).

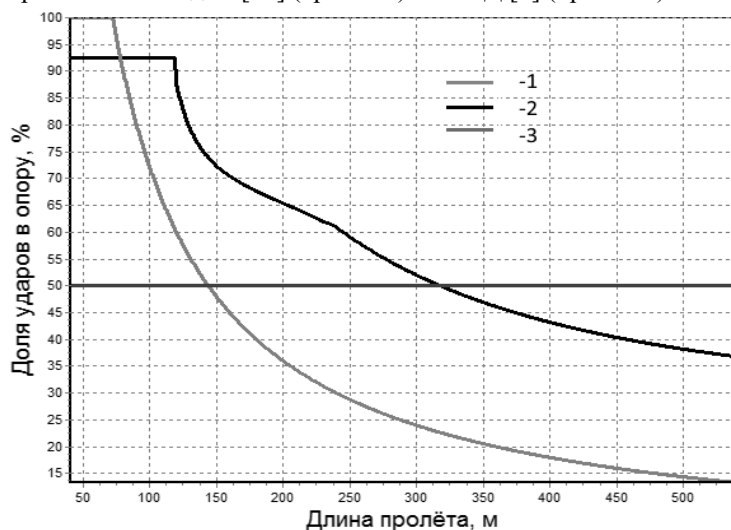


Рис. 3. Доля ударов молнии в опору на ВЛ без троса для опор высотой 40 м, траверсы – 32 м, длине гирлянды изоляторов 2,3 м, длине верхней траверсы 3,5 м:
1 – [10]; 2 – [данная работа], 3 – [7]

В руководстве [7], на основании которого проводятся расчеты грозоупорности ВЛЭП, на линиях без молниезащитного троса рекомендуется принимать долю ударов в опору с коэффициентом 0,5 от общего числа ударов в пролет. Из наших оценок, представленных на рис. 3, следует, что при малых расстояниях между опорами, что характерно для первых пролётов ВЛ от подстанций, оценка доли ударов в опоры существенно больше 0,5. В соответствии с ГОСТ [2] при длинах пролётов меньших 70 м молния в фазный провод вообще не ударяет. Если молния в фазные провода не ударяет, а такой пролёт является анкерным, то зачем на нём ставить молниезащитный трос? Доля ударов в опору по [2] равна 0,5 лишь при длине пролета около 140 м, что часто встречается в середине анкерных пролётов ВЛЭП вдали от подстанций. Во всех остальных случаях применение данного коэффициента приведет к повышению погрешности проводимых расчетов. Все это подтверждает необходимость пересмотра подхода к определению доли ударов молнии в опору пролета ВЛ.

Вывод

Описанный подход к оценке долей ударов молний в опоры и фазные провода на ВЛЭП 110, 220 кВ без молниезащитного троса свидетельствует о необходимости пересмотра существующих концепций и уточнения доли ударов в опоры пролёта при разных расстояниях между опорами. Всё это позволит снизить погрешность проводимых расчетов, что поможет в оценке грозоупорности ВЛ 110, 220 кВ.

Литература

1. Базелян Э.М. Проблемы нормирования молниезащиты в России // V Международная конференция по молниезащите. СПб, 2016.
2. ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы. Введ. 2011-12-01. М.: Стандартиформ. 2011.
3. Гумерова Н.И., Ефимов Б.В., Репкина О.Д. Рекомендации по защите оборудования подстанций от набегающих волн грозового происхождения с использованием ОПН // IV Международная конференция по молниезащите. СПб, 2014. С. 87–97.
4. Золотых А.Г., Енькин Е.Ю., Подпоркин Г.В., Сиваев А.Д. Применение полимерных изоляторов-разрядников для молниезащиты воздушных линий электропередачи и повышения надежности работы оборудования подстанций 35 и 110 кВ // IV Международная конференция по молниезащите. СПб, 2014. С. 330–334..
5. Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Пильщиков В.Е. Молниезащита ВЛ на основе мультикамерных разрядников нового поколения // IV Международная конференция по молниезащите. СПб, 2014.
6. ПУЭ Правила устройства электроустановок. Изд. 7-е. Разд. 2. Введ. 2003-01-01. Утв. Минэнерго России. М.: Изд.НЦ ЭНАС, 2002.
7. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кв от грозовых и внутренних перенапряжений. Утв. РАО «ЕЭС России» 12.07.1999. М.: Издательство ПЭИПК, 1999.
8. СО 153-34.21.122-2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. Утв. Минэнерго России 30.06.2003. ЦПТИ ОРГРЭС, 2004.
9. Туманов О.В., Репкина М.Б. Совершенствование систем заземления опор ВЛ с целью повышения грозоупорности ВЛ и ПС // IV Международная конференция по молниезащите. СПб, 2014. С. 155–163.
10. Усачев А.Е., Юдицкий Д.М. Методика расчёта грозоупорности воздушных линий электропередачи по параметрам опор и пролётов с учётом ветровой нагрузки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 7–8. С. 70–76.
11. Усачев А.Е., Юдицкий Д.М. Новая концепция защиты подстанций от волн грозовых перенапряжений // Известия высших учебных заведений: Проблемы энергетики. 2014. № 11–12. С. 94–100.
12. Rizk F.A.M. and F. Vidal, IEEE Trans. Power Deliv., 23(1), 296, 2008.
13. Cooray V., Nucci C.A., Rachidi F. On the Possible Variation of the Lightning Striking Distance as Defined in the IEC Lightning Protection Standard as a Function of Structure Height. Intern. Conf. on Lightning Protection, Vienna, Austria. 2012.

Авторы публикации

Юдицкий Данил Михайлович – руководитель проектно-исследовательского центра ООО «НПК «Силеста». E-mail: yuditskiydm@mail.ru.

Усачёв Александр Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова» (ЭС) «Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ)». E-mail: aleksandr_usachev@rambler.ru.

References

1. Bazelyan, E. M. problems of standardization of lightning protection in Russia // the V international conference on lightning protection. SPb.: 2016.
2. GOST R IEC 62305-1-2010 "Management of risk. Lightning protection. General principles" dated November 30, 2010 No. 795-St // STANDARTINFORM. 2010.

3. Gumerova N. I., Efimov B. V., Repkina O. D. Recommendations on the protection equipment of substations from oncoming waves of storm origin using surge arresters // IV international conference on lightning protection. SPb.: 2014. P. 87–97.

4. Golden A. G., Anikin E. J., Podporkin G. V., Sivaev A. D. the Use of polymeric insulators-arresters for lightning protection of overhead power lines and improve reliability of substation equipment 35 kV and 110 kV // IV international conference on lightning protection. SPb.: 2014. Pp. 330–334..

5. Podporkin G. V., Anikin E. Y., sawyers V. E. Lightning protection overhead power lines based on multi-chamber arresters new generation // IV international conference on lightning protection. SPb: 2014.

6. Regulations for Electrical Installation. 7th Edition.

7. GD 153-34.3-35.125-99 "Guide for the protection of electrical networks 6-1150 kV against lightning and internal overvoltages", dated July 12, 1999 Publisher PEIPK. 1999

8. SO 153-34.21.122-2003. "Instructions for installation of lightning protection of buildings, constructions and industrial communications", dated 30 June 2003 No. 280 // tisc ORGRES. 2004

9. Tumanov, O. V., Repkina M. B. Improvement of grounding of supports of overhead lines to increase grotophorst PL and substation // IV international conference on lightning protection. SPb: 2014. P. 155–163.

10. Usachev A. E., D. M. Yuditskii Method of calculating grotophorst of overhead power lines in the parameters of the supports and spans taking into account wind loads // proceedings of higher educational establishments: Problems of energy. 2014. № 7–8. P. 70–76.

11. Usachev A. E., D. M. Yuditskii, a New concept for the protection of substations from lightning surges waves // proceedings of higher educational establishments: Problems of energy. 2014. № 11–12. P. 94–100.

12. Rizk, F.A.M. and F. Vidal, IEEE Trans. Power Deliv., 23 (1), 296, 2008.

13. V. Cooray, C. A. Nucci, F. Rachidi. On the Possible Variation of the Lightning Striking Distance as Defined in the IEC Lightning Protection Standard as a Function of Structure Height. Intern. Conf. on Lightning Protection, Vienna, Austria, 2012.

Authors of the publication

Judickij Danil Mihajlovich. – Research and production company Silesta Ltd. E-mail: yuditskiydm@mail.ru.

Usachev Aleksandr Evgen'evich. – State Educational Institution "Kazan State Power Engineering University", chair «Power Stations», Professor, Doctor of Physics and Mathematics. E-mail: aleksandr_usachev@rambler.ru.

Поступила в редакцию

09 октября 2017 года.

УДК 658.583

ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОНАЛАДОЧНЫМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАНЖИРОВАНИЯ РАБОТ

Н.В. Голубцов, О.В. Федоров

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Резюме: На примере тепловой электростанции рассмотрены специфические особенности управления производственным процессом в пусконаладочный период возведения объекта, насыщенного современным высокотехнологичным оборудованием и инженерными системами. Рассмотрен состав затрат времени на пусконаладочные работы и испытания оборудования и инженерных систем. Выполнен анализ особенностей маневрирования трудовыми ресурсами в процессе регулирования хода пусконаладки. Охарактеризована модель влияния возможной численности наладочной бригады на длительность выполнения пусконаладочных работ. Выведены математические зависимости между продолжительностью выполнения пусконаладочных работ и численностью наладочных бригад, включающие коэффициент эффективности использования дополнительного к оптимальному составу количества наладчиков. Предложен и обоснован метод выработки рациональных управленческих решений, предусматривающий ранжирование пусконаладочных работ по их весомости в общей системе наладки. Для этого введено понятие технологических приоритетов, которые учитывают степень технологической зависимости друг от друга функционально-технологических узлов тепловой электростанции во время выполнения пусконаладочных работ. Кроме того, введено понятие динамических приоритетов, учитывающих сложившуюся производственную ситуацию на момент принятия решения по составлению или корректировке календарных и оперативно-производственных планов в пусконаладочный период возведения тепловой электростанции.

Ключевые слова: электростанция, пусконаладочные работы, управление, технологическая весомость, приоритеты, ранжирование

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-11-22

EFFECTIVE MANAGEMENT OF THE START-UP AND ADJUSTMENT AT THE POWER STATION BY RANKING TASKS

N.V. Golubtsov, O.V. Fedorov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: The specific features of the control of the production process during the commissioning (the start-up and adjustment) of a thermal power plant are considered. The composition of the time spent on start-up and adjustment of modern high-tech equipment and engineering systems is considered. In the article a mathematical relationship between the duration of the start-up and adjustment works and the number of employees in the brigade, including the rate of efficiency in the use of an exceeding the optimum number of employees is described. A method for the development of rational management solutions was proposed and

justified, providing for the ranking of start-up and adjustment works on their weight in the overall system of adjustment. For this purpose, the notion of technological priorities has been introduced, which take into account the degree of technological dependence of functional and technological nodes of the thermal power plant during the start-up and adjustment works. In addition, the concept of dynamic priorities that take into account the existing production situation at the time of making a decision to compile or adjust the calendar and operational and production plans in the commissioning period of the thermal power plant is being built.

Keywords: *electric power station, start-up and adjustment works, management, technological importance, prioritization, ranking*

Эффективный рост экономики в сложных геополитических условиях необходим России для успешного противостояния внутренним и внешним вызовам и угрозам в XXI веке. Экономика нашей страны сможет конкурентно развиваться лишь на основе широкого использования инновационных технологий, оборудования, материалов при условии эффективного потребления всех видов ресурсов. Особенно возрастают требования к качеству трудовых ресурсов, прежде всего – к профессиональной квалификации всех категорий работников и к эффективности использования «живого труда». В условиях продолжающегося развертывания научно-технической революции новые и реконструируемые объекты экономики производственного и социального назначения все более насыщаются современным высокотехнологичным оборудованием и инженерными системами. Отсюда, особое значение приобретает эффективность выполнения тех работ, которые обеспечивают подготовку и ввод смонтированного оборудования в эксплуатацию. Эти работы, согласно ГОСТ Р 56203-2014, называются пусконаладочными работами (далее ПНР). Практика показывает, что при управлении производственным процессом возведения объектов на стадии ПНР, которая является завершающей стадией строительства, имеются специфические особенности, без учета которых невозможно обеспечить надежное и эффективное достижение конечной цели строительства – ввод объекта в эксплуатацию [1]. Согласно ГОСТ Р 57363-2016¹ контроль за ПНР и организацию подготовки объекта к сдаче в эксплуатацию осуществляет Управляющий проектом, который представляет управляющую компанию или непосредственно организацию застройщика (инвестора), а также определяет режим эксплуатации объекта в период индивидуальных и комплексных испытаний инженерных систем, оборудования, их приемки.

Одна из особенностей ПНР – преобладание затрат «живого труда» по сравнению со строительно-монтажными работами (далее СМР), выполняемыми на предыдущих стадиях строительства, – нашла четкое отражение в сборниках государственных элементных сметных норм на пусконаладочные работы (сборники ГЭСНп в редакции 2017 г.). Так, в таблицах ГЭСНп, порядок применения которых определен приказом Минстроя России №1028/пр от 29 декабря 2016 г., в отличие от таблиц сборников государственных элементных сметных норм на строительные и специальные строительные работы (сборники ГЭСН), на ремонтно-строительные работы (сборники ГЭСНр), на монтаж оборудования (сборники ГЭСНм), не приведены ресурсные показатели расхода материальных, энергетических ресурсов, сырья, полуфабрикатов, используемых при проведении ПНР, расхода применяемых механизмов. Таблицы ГЭСНп, учитывая специфические особенности ПНР, содержат нормы расхода лишь трудовых ресурсов: сведения о составе звена (бригады) исполнителей ПНР (количество, специальности

¹ Управление проектом в строительстве. Деятельность управляющего проектом (технического заказчика) от 16.12.2016 № 9 2043-ст. // Стандартинформ. 2017 г.

инженерно-технических работников (ИТР) и рабочих); затраты труда отдельных исполнителей ПНР и в целом на звено. Также в ГЭСНп может приводиться квалификационный состав звена (бригады). Таким образом, в пусконаладочный период (далее ПНП) снижается интенсивность потребления материально-технических ресурсов и «овеществление» труда наладчиков происходит не в результате возведения ими строительных конструкций, а в процессе придания уже смонтированному оборудованию новых качеств – способности функционировать в условиях конкретного объекта.

Проанализируем особенности управления производственным процессом в ПНП возведения объектов на примере завершающего этапа строительства (реконструкции, модернизации) тепловой электрической станции (далее ТЭС) как объекта, для которого характерно насыщение большим разнообразием высокотехнологичного оборудования и инженерных систем, требующих наладки. На ТЭС, согласно СТО НОСТРОЙ 234², ПНР проводятся по следующим основным направлениям: а) тепломеханическое оборудование; б) электротехническое оборудование; в) программно-технические средства автоматизированных систем контроля и управления (далее АСУ), в том числе АСУ технологическим процессом (далее АСУ ТП). В качестве основной технологии производства ПНР СТО НОСТРОЙ 234 устанавливает принцип наладки функционально-технологических узлов (далее ФТУ) ТЭС. Производственный процесс возведения ТЭС на заключительном этапе строительства – этапе ПНР, характеризуется повышенной ответственностью управленческих решений с точки зрения их влияния на возможность своевременного успешного достижения конечной цели строительства. Это объясняется разной значимостью одной и той же величины рассогласования хода работ с календарным планом для различных моментов планового периода. Чем ближе срок ввода объекта в эксплуатацию, тем остается меньше времени для устранения рассогласования. В то же время, ПНП характеризуется повышением стохастичности производственного процесса в сравнении с предшествующими периодами строительства ТЭС, поскольку при выполнении ПНР и испытаний оборудования и инженерных систем выявляются брак и дефекты, допущенные на всех предыдущих стадиях строительства любыми из его участников: проектировщиками, строителями, монтажниками, изготовителями оборудования, заказчиками. Поэтому, для завершающей стадии строительства ТЭС могут быть характерны авралы, штурмовщина, нерациональный расход ресурсов. Подчас это становится причиной срыва сроков ввода объекта в эксплуатацию. Подобное положение возможно, если особенности ПНП при строительстве объектов не учитываются в должной мере.

Таким образом, для достижения конечной цели строительства ТЭС в ПНП необходимо выделять и добиваться выполнения промежуточных целей на сравнительно небольших отрезках времени. Эти задачи решаются системой оперативного управления. В настоящее время развитие информационно-вычислительных систем дает возможность эффективно решать задачи оперативного управления в организационных системах [2]. В то же время для оптимизации режимов электроэнергетических систем, для решения вопросов технического диагностирования и получения добротной информации о состоянии энергетического оборудования разрабатываются алгоритмы и методы [3–5], основные положения которых могут быть использованы в решении не только технических, но и организационно-экономических вопросов выполнения ПНР при подготовке ТЭС к эксплуатации. Важно и то, что продолжают оставаться актуальными более ранние разработки исследователей теории управления. Так, в работах М.К. Бабунашвили и его коллег [6] исследованы вопросы формирования оперативных

²Стандарт организации Национальное объединение строителей (СТО НОСТРОЙ) "Пусконаладочные работы. Организация выполнения пусконаладочных работ на тепловых электрических станциях. Общие требования" (Проект. Окончательная редакция) // Комитет по строительству объектов энергетики и электросетевого хозяйства Национального объединения строителей. 2016 г. № 234. Ст. 5.2

управляющих воздействий в организационных системах, заключающихся в перераспределении ресурсов в подсистемах. Опираясь на эти разработки и учитывая специфические особенности ПНР, охарактеризуем возможности повышения эффективности управления ПНР на ТЭС. На рис. 1 показан график, отражающий состав затрат времени на завершающем этапе производственного процесса в разрезе отдельной системы или ФТУ, насыщенного оборудованием, требующим наладки. В отличие от графиков, характеризующих движение организационной системы к цели со скоростью не ниже нулевой [6], на рис. 1 учтена специфика ПНР и испытаний как работ, завершающих технологическую последовательность производственного процесса строительства. Показана возможность ситуации появления незапланированных в календарном плане ПНР работ, что означает признание возможной скорости движения подсистемы к цели не только равной нулю (прямая 1–2, параллельная оси абсцисс), но и условно отрицательной скорости (прямая 1–3). Считаем, что потери времени, допущенные по организационным причинам (разрыв между окончанием ПНР и началом испытаний, между выявлением дефекта и началом работ по его устранению и т.п.), входят в соответствующие слагаемые выражения (1), и потому они не выделены в нём отдельно.

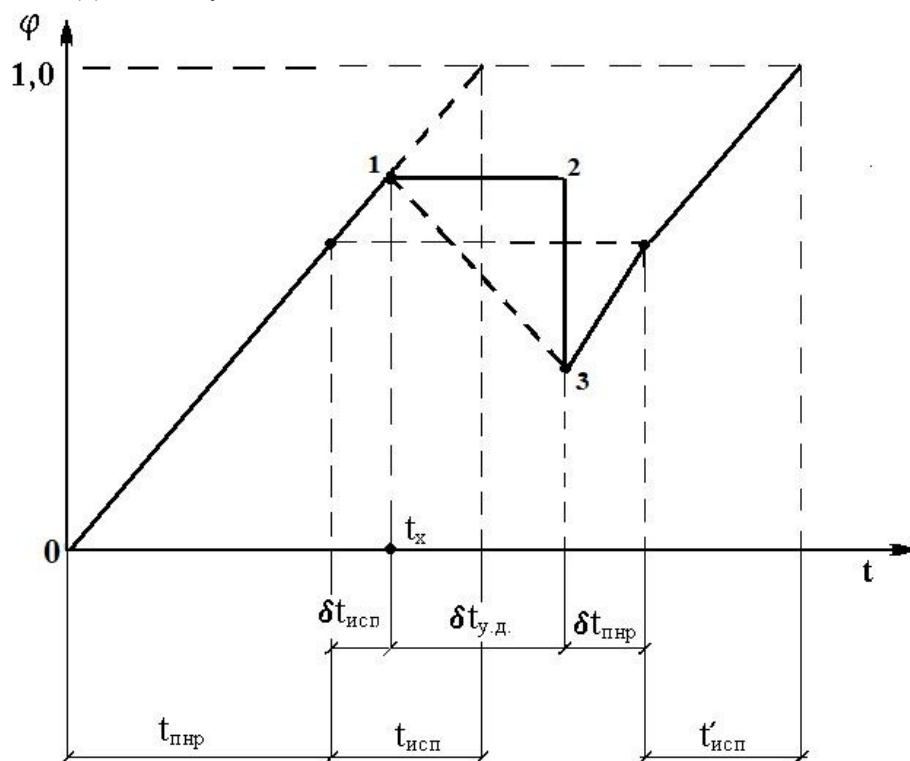


Рис. 1. Состав затрат времени на пусконаладочные работы и испытания по отдельной системе или ФТУ объекта $t_{\text{пнр}}$ – время на пусконаладку; $t_{\text{исп}}$ – продолжительность испытаний, предусмотренных программой; $\delta t_{\text{исп}}$ – длительность испытаний до выявления дефекта (потери времени на сорванные испытания); $t_{\text{х}}$ – время выявления дефекта; $\delta t_{\text{у.д.}}$ – затраты времени на устранение дефекта; $t'_{\text{исп}}$ – продолжительность повторных испытаний; φ – доля выполненных ПНР

Отсюда, общие размеры потерь времени $\delta t_{\text{пот}}$, связанных с допущенным браком, можно определить по формуле

$$\delta t_{\text{пот}} = \delta t_{\text{исп}} + \delta t_{\text{у.д.}} + \delta t_{\text{пнр}} . \quad (1)$$

Своевременная ликвидация дефектов (проекта, СМР, оборудования) – это, по сути, устранение возмущающих воздействий на ход ПНР. Но полностью устранить все возмущающие воздействия и реализовать в чистом виде метод регулирования хода пуска наладочного производственного процесса по возмущениям невозможно. Целесообразно иметь и использовать в управлении рациональные методы регулирования по отклонениям.

Известно, что в практике строительства отклонения хода работ от графика устраняются, как правило, путем переброски дополнительных ресурсов (технических, материальных, трудовых) на работы критического пути. Но, как отмечено выше, в ПНП могут эффективно использоваться для регулирования хода работ лишь трудовые ресурсы. В то же время, использование трудовых ресурсов для регулирования хода работ в ПНП имеет ограничения по следующим причинам: во-первых, количество рабочих мест для персонала наладчиков ограничено в большей степени, чем в предшествующие ПНП периоды СМР. Например, если комплектное распределительное устройство (далее КРУ) электростанции состоит из десятков шкафов или блоков, то это не даёт возможности на каждый шкаф поставить по наладчику, так как наладка КРУ должна осуществляться в комплексе; во-вторых, взаимозаменяемость наладчиков относительно слаба в связи с усилением их специализации, что обусловлено возрастающими требованиями к квалификации персонала по причине усложнения современного оборудования и технологических процессов, появления новых функций АСУ ТП, ускорением динамики технологических изменений в выработке электроэнергии на ТЭС, изменением самой технологии выполнения ПНР [7]; в-третьих, и это характерно именно для ПНП: возможность организации сменной работы для наладчиков затруднена, так как сменщик во многих случаях сможет выполнять ПНР во вторую смену лишь после того, как проанализирует сделанное в первую смену его предшественником. Затраты же времени на такой анализ при сложной наладке могут быть соизмеримы с продолжительностью самой смены.

С учётом перечисленных особенностей ПНП при возведении ТЭС нами разработана методика оперативного управления пусконаладочным процессом. Очевидно, что завершение ПНР на каждом ФТУ не должно считаться самостоятельной задачей вне связи с конечной целью строительства ТЭС – её своевременным вводом в эксплуатацию. Отметим, что срыв сроков выполнения работ на разных ФТУ не одинаково влияет на возможность соблюдения календарного плана всего комплекса работ, выполняемого на завершающем этапе строительства ТЭС. Причина – наличие сложных технологических зависимостей между ФТУ. Разработанная методика содержит алгоритм выработки оперативных управленческих решений на основе системы приоритетов. Принцип использования приоритетов: предпочтение отдаётся тем управленческим решениям при их вариантной проработке, которые обеспечивают более высокую надёжность выполнения ПНР на ФТУ с более высокими приоритетами [8].

Для реализации этого принципа все ФТУ ТЭС ранжируются по признаку степени технологической зависимости друг от друга выполняемых на них ПНР. В связи с этим, введено понятие технологической весомости ФТУ. Для ранжирования ФТУ по их технологической весомости применён метод, известный как метод расстановки приоритетов [9]. В его основе лежит матрица парных сравнений ранжируемых ФТУ и расчёт относительной величины технологических приоритетов путём итераций. Расчёт выполняется на компьютере с применением разработанных с участием авторов статьи программ, зарегистрированных в Реестре программ для ЭВМ: «Выбор рациональных управленческих решений по приоритетам» №2012613123 от 30.03.2012 и «Остаточный ресурс электротехнических комплексов и систем» №2012660206 от 14.11.2012. Величину технологических приоритетов, согласно разработанной методике, следует учитывать при составлении календарных и оперативно-производственных планов для определения

степени напряжённости работ, количества выделяемых резервов ресурсов и др.

В процессе же выполнения ПНР алгоритм предписывает формировать регулирующие воздействия в зависимости не только от значений технологических приоритетов ФТУ (значит и приоритетов выполняемых на них ПНР), но и от сложившейся производственной ситуации, которую предлагается характеризовать коэффициентом динамической напряжённости работ. Этот коэффициент рассчитывается как отношение необходимого (расчётного) для выполнения всего объёма ПНР времени к времени, оставшемуся до планового срока её окончания. Для корректного сопоставления производственной ситуации и технологической весомости ПНР, характеризуемой технологическими приоритетами, введено понятие «динамические приоритеты работ», которые определяются величиной коэффициентов напряжённости этих работ. Таким образом, в любой момент времени все ПНР могут быть ранжированы с определением численной величины их общего приоритета, получаемого на основе значений технологических и динамических приоритетов.

Если не принимать во внимание рассмотренную выше склонность ПНР к быстрому насыщению фронта работ рабочей силой, то продолжительность t выполнения ПНР на ФТУ можно рассчитывать по следующей формуле:

$$t = \frac{W}{A}, \quad (2)$$

где W – трудоёмкость выполнения ПНР на ФТУ; A – количество человек, участвующих в выполнении ПНР.

В этом случае возможность влияния на скорость пусконаладки ФТУ в процессе регулирования хода работ ограничивалась бы только располагаемой численностью наладчиков. Но ясно без доказательств, что сроки пусконаладки не могут быть меньше длительности испытаний оборудования, предписанных нормами и программой, и потому линия $t=0$ (рис. 2) не может быть горизонтальной асимптотой графика зависимости $t = f(A)$, следовательно, формула (2) не отражает эту зависимость.

Преобразуем формулу (2), выделив отдельно длительность испытаний:

$$t = \frac{W'}{A} + t_{\text{исп}}, \quad (3)$$

где W' – трудоёмкость ПНР на ФТУ без учёта трудоёмкости испытаний; $t_{\text{исп}}$ – длительность испытаний оборудования и систем ФТУ.

Проанализируем формулу (3) применительно к отдельному ФТУ. Выше было отмечено, что трудоёмкость ПНР зависит от качества предшествующих работ, в том числе качества проектной документации, качества оборудования: чем ниже качество, тем сложнее регулировки, больше затраты времени. Поэтому на этапе планирования речь должна идти о расчётной трудоёмкости ПНР, определяемой по формуле

$$W_{\text{расч.}i} = A_{\text{опт.}i} \cdot t_{\text{расч.}i}, \quad (4)$$

где $A_{\text{опт.}i}$ – оптимальная численность наладчиков для выполнения ПНР на i -м ФТУ; $t_{\text{расч.}i}$ – расчётная продолжительность выполнения ПНР на i -м ФТУ при оптимальной численности наладочной бригады (звена) и без учёта продолжительности испытаний.

Отсюда, из выражений (3) и (4) имеем:

$$t_{\text{опт.}i} = t_{\text{расч.}i} + t_{\text{исп.}i} = \frac{W_{\text{расч.}i}}{A_{\text{опт.}i}} + t_{\text{исп.}i}, \quad (5)$$

где $t_{\text{опт.}i}$ – оптимальный срок выполнения ПНР и испытаний на i -м ФТУ; $t_{\text{исп.}i}$ – длительность испытания оборудования и систем i -го ФТУ.

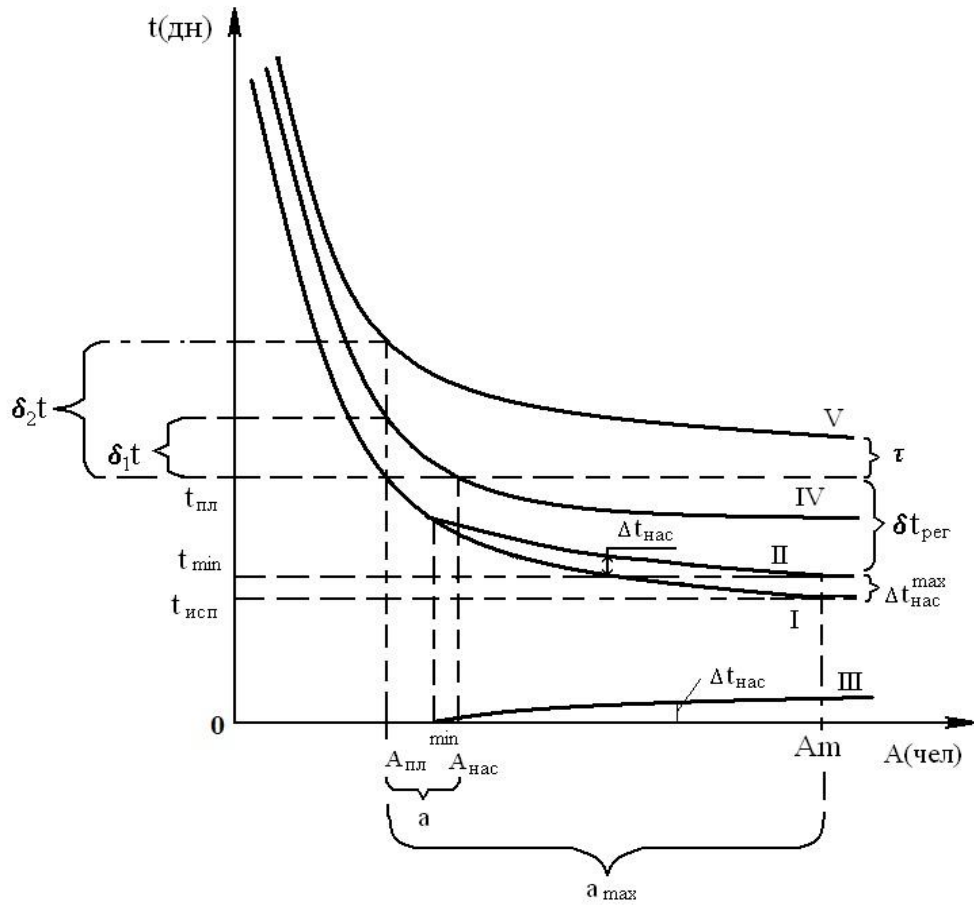


Рис. 2. Зависимость длительности ПНР t от численности наладчиков A

В случае необходимости сократить срок выполнения работ на i -м ФТУ при регулировании хода ПНР следует увеличить численность бригады на a_i человек. В этом случае длительность выполнения ПНР t_i на i -м ФТУ будет определяться по формуле

$$t_i = \frac{W_{\text{расч.}i}}{A_{\text{опт.}i} + a_i} + t_{\text{исп.}i} \quad (6)$$

Зависимость (6) будем рассматривать в виде: $t_i = f(A_i)$, где $A_i = A_{\text{опт.}i} + a_i$. Графиком данной зависимости является гипербола I (рис. 2) с горизонтальной асимптотой $t = t_{\text{исп.}}$. Но и этот график не отражает реальную зависимость $t = f(A)$, т.к. он не учитывает эффект насыщения фронта работ рабочей силы. С учётом же насыщения зависимость (6) можно заменить следующей:

$$t'_i = \frac{W_{\text{расч.}i}}{A_{\text{опт.}i} + a_i} + t_{\text{исп.}i} + \Delta t_{\text{нас.}} \quad (7)$$

где t'_i - общая продолжительность ПНР и испытаний на i -м ФТУ с учётом насыщения фронта работ наладчиками; $\Delta t_{\text{нас.}}$ - добавка к расчётной длительности выполнения ПНР, вызываемая эффектом насыщения.

Графиком зависимости (7) в осях $A-t$, где $A = A_{\text{опт.}} + a$, является кривая II. Но сама величина $\Delta t_{\text{нас.}}$ также зависит от численности A наладчиков:

$$\Delta t_{\text{нас.}} = \gamma(A), \quad (8)$$

где γ – вид зависимости, определяемый видом работ и условиями их выполнения (на рис. 2 показан кривой III).

Для анализа возможностей результативного маневрирования численностью наладчиков A на рис. 2 представлены графики I, II и III зависимостей (6), (7) и (8) соответственно. Из рис. 2 видно, что для выполнения ПНР в плановый срок потребуются плановое количество наладчиков $A_{\text{пл.}}$. При увеличении же численности наладчиков сверх плановой на a человек сроки наладки будут уменьшаться, асимптотически приближаясь к минимальному сроку $t_{\text{мин}}$. Начиная с некоторой численности наладчиков $A_{\text{нас.}}^{\text{мин}}$, будет появляться эффект насыщения. При достаточно близком приближении графика II зависимости (7) к асимптоте $t = t_{\text{мин}}$, например, на расстояние 1 час (наименьший предел оперативного регулирования) наступает предел насыщения, при котором численность $A_{\text{т}}$ наладчиков является наибольшей для регулирования величиной. Очевидно, численность наладчиков $A_{\text{нас.}}^{\text{мин}}$, с превышением которой начнёт проявляться эффект насыщения, будет определяться видом ПНР.

В процессе проведения исследований были получены данные об оптимальной численности наладочных бригад $A_{\text{бр.}i}^{\text{опт.}}$ для типовых наборов работ по наладке отдельных видов электрооборудования и систем автоматики, а также сроки выполнения этих работ бригадами (звеньями) различной численности. Полагаем, что трудоёмкость W выполнения работ бригадой оптимальной численности следует считать оптимальной трудоёмкостью:

$$W_{\text{опт.}i} = A_{\text{бр.}i}^{\text{опт.}} \cdot t_{\text{опт.}i}, \quad (9)$$

где $W_{\text{опт.}i}$ – оптимальная (расчётная) трудоёмкость i -й работы; $t_{\text{опт.}i}$ – срок выполнения i -й работы бригадой оптимальной численности.

Важно отметить, что оптимальная трудоёмкость не всегда является минимальной, поскольку при выполнении ряда наладочных операций включение в состав звена дополнительного работника объясняется не соображениями эффективного использования труда наладчиков, а требованиями техники безопасности [10]. Таким образом, результатом форсирования при необходимости хода ПНР будет сокращение сроков выполнения работ – непропорциональное, в ряде случаев, увеличению численности наладчиков. Это приведёт к снижению производительности труда на регулируемых работах. Но снижение эффективности использования наладчиков на отдельных ФТУ, тем не менее, может быть целесообразным в конкретной производственной ситуации, вызывая положительный эффект синергии в масштабе вводимой в эксплуатацию ТЭС.

Для оценки допустимых пределов регулирующих воздействий и выполнения расчётов потребности наладчиков введём коэффициент η эффективности использования дополнительных работников при регулировании ПНР. Для его определения величину объёма каждой i -й ПНР будем измерять её оптимальной трудоёмкостью $W_{\text{опт.}i}$. Тогда при выполнении всего объёма $W_{\text{опт.}i}$ i -й ПНР бригадой наладчиков численностью $A_{\text{бр.}i}^{\text{опт.}} + a$ за время $t_{\text{мин.}i}$ справедливо следующее равенство:

$$t_{\text{мин.}i} (A_{\text{бр.}i}^{\text{опт.}} + \eta_i a) = W_{\text{опт.}i}, \quad (10)$$

где трудоёмкость ПНР при оптимальной численности наладчиков $W_{\text{опт.}i}$ определяется

выражением (9).

На основании выражений (9) и (10) имеем:

$$\eta_i = \frac{A_{\text{бр.}i}^{\text{опт}}(t_{\text{опт.}i} - t_{\text{min.}i})}{a \cdot t_{\text{min.}i}}. \quad (11)$$

По формуле (11) был выполнен расчет значений коэффициента η для различных типовых наборов ПНР с целью их использования в решении задач оперативного управления производственным процессом на завершающем этапе строительства ТЭС.

Метод расстановки приоритетов, согласно [11], даёт возможность не только ранжировать работы по определённому признаку, но и оценить количественно соотношение весомостей ПНР, выполняемых на разных ФТУ ТЭС, относительно выбранного критерия. Выбор критерия для определения степени выраженности признака, по которому осуществляется ранжирование ФТУ, представляет собой сложную и ответственную задачу. Для её решения при разработке методики оперативного управления ПНР мы исходили из того, что ранжирование ФТУ, в конечном итоге, имеет предназначение повысить устойчивость календарного плана работ на завершающем этапе строительства ТЭС. Устойчивость календарного плана может обеспечиваться: а) резервами времени для компенсации отрицательного воздействия на ход производства случайных факторов; б) резервами ресурсов (для ПНР, главным образом, трудовых), с помощью которых можно при необходимости форсировать выполнение тех или иных работ.

Рассмотрим взаимосвязь этих двух видов резервов как факторов устойчивости календарного плана работ. Заметим, что быстротечность ПНР обуславливает то, что работы, не лежащие на критическом пути, могут иметь резервы времени, главным образом, в пределах нескольких дней. Причём эти резервы времени соизмеримы с вероятными простоями вследствие выявления в процессе наладки и испытаний дефектов, допущенных на предыдущих этапах строительства ТЭС. Таким образом, в календарном плане работ завершающего этапа строительства ТЭС вероятно появление некоторого количества околोकритических путей. Отсюда, важное значение приобретает вопрос учета, оценки и использования резервов времени.

Покажем, что один и тот же резерв времени для разных работ может иметь разный вес с точки зрения влияния на устойчивость календарного плана работ. Так, можно утверждать, что при равенстве резервов времени i -й и j -й работ, т.е. $t_{\text{рез.}i} = t_{\text{рез.}j}$, тем не менее, вес величины $t_{\text{рез.}i}$ может быть больше веса величины $t_{\text{рез.}j}$: $P(t_{\text{рез.}i}) > P(t_{\text{рез.}j})$.

Это утверждение будет справедливо, когда возможность насыщения фронта i -й работы наладчиками за счёт увеличения их численности, в том числе и при организации сменной работы, будет выше, чем для j -й работы. Отсюда следует, что ранжирование ФТУ ТЭС целесообразно проводить с ориентацией их приоритетов не только на резервы времени, выделяемые в календарном плане работ, а и на резервы трудовых ресурсов, которыми располагает пусконаладочная организация. При этом следует учитывать ограничения, связанные с эффектом насыщения фронта работ (рис. 2). Для того, чтобы учесть оба вида резервов (времени и трудовых ресурсов) в одном показателе, введено понятие резерва трудоёмкости. Под расчётным резервом трудоёмкости $W_{\text{рез.}i}^{\text{расч.}}$ i -й работы в рассматриваемой методике понимается трудоёмкость, определяемая по формуле

$$W_{\text{рез.}i}^{\text{расч.}} = t_{\text{рез.}i}(A_{\text{расч.}i} + \eta_i a_{mi}) + \eta_i a_{mi} t_{\text{опт.}i} = A_{\text{расч.}i} t_{\text{рез.}i} + \eta_i a_{mi} (t_{\text{опт.}i} + t_{\text{рез.}i}), \quad (12)$$

где $t_{\text{опт.}i}$ – продолжительность выполнения i -й работы с расчётной скоростью, т.е. при оптимальной численности наладчиков: $t_{\text{расч.}i} = t_{\text{опт.}i}$; $t_{\text{рез.}i}$ – свободный резерв времени

i -й работы; $A_{\text{расч.}i}$ – расчётная (оптимальная) численность наладчиков для i -й работы, т.е. $A_{\text{расч.}i} = A_{\text{бр.}i}^{\text{опт.}}$; a_{mi} – максимально возможная по условиям насыщения и организации сменной работы дополнительная сверх расчётной (оптимальной) численность наладчиков для i -й работы; η_i – коэффициент эффективности использования трудовых ресурсов, дополнительно привлекаемых к выполнению i -й работы. Величину a_{mi} можно определить по формуле

$$a_{mi} = A_{mi} - A_{\text{бр.}i}^{\text{опт.}}, \quad (13)$$

где A_{mi} – максимально возможная численность наладочной бригады для выполнения i -й пусконаладочной работы.

В случае если по условиям располагаемого времени необходимо запланировать продолжительность выполнения i -й работы $t_{\text{пл.}i} < t_{\text{расч.}i}$, то и плановую численность бригады наладчиков $A_{\text{пл.}i}$ придётся принять больше оптимальной численности $A_{\text{бр.}i}^{\text{опт.}}$, т.е. $A_{\text{пл.}i} > A_{\text{бр.}i}^{\text{опт.}}$. Но тогда величина возможных регулирующих воздействий в ходе работ сокращается, что характеризуется уменьшением резерва по трудоёмкости. По аналогии с выражением (12) плановый резерв по трудоёмкости можно определить по следующей формуле:

$$W_{\text{рез.}i}^{\text{пл.}} = t_{\text{рез.}i} (A_{\text{пл.}i} + \eta_i a'_{mi}) + \eta_i a'_{mi} t_{\text{пл.}i} = A_{\text{пл.}i} t_{\text{рез.}i} + \eta_i a'_{mi} (t_{\text{пл.}i} + t_{\text{рез.}i}), \quad (14)$$

где $A_{\text{пл.}i}$ – плановая численность наладочной бригады для выполнения i -й работы; $t_{\text{пл.}i}$ – продолжительность выполнения i -й работы с плановой скоростью; a'_{mi} – максимально возможная по условиям насыщения и организации сменной работы дополнительная сверх плановой численность наладчиков для выполнения i -й работы, т.е. $a'_{mi} = A_{mi} - A_{\text{пл.}i}$.

Если же организация имеет ограниченные возможности маневрирования трудовыми ресурсами и не сможет обеспечить при необходимости насыщение фронта работ наладчиками, то это, соответственно, должно быть учтено при определении расчётной величины a'_{mi} в формуле (14).

Таким образом, в состав исходных данных для разработки календарного плана производства ПНР на завершающей стадии строительства ТЭС должны входить значения перечисленных величин, которые используются для расчёта резерва трудоёмкости $W_{\text{рез.}i}$ ПНР.

Применение метода, предусматривающего ранжирование ПНР по технологическим и динамическим приоритетам, позволяет обеспечить повышение эффективности управления пусконаладочным процессом при подготовке ТЭС к сдаче в эксплуатацию. Представленная в статье методика может быть, по нашему мнению, использована в управлении производственными процессами завершающей стадии возведения не только ТЭС, но и других объектов, насыщенных современным высокотехнологичным оборудованием. Методика даст возможность руководителям генподрядных, субподрядных и наладочных организаций повысить качество анализа, обоснованность планирования и повысить эффективность регулирующих воздействий на уровнях оперативного управления производственными процессами.

Литература

1. Голубцов Н.В., Комышанов О.П. Рационализация оперативного управления пусконаладочными работами на строящихся тепловых электростанциях // Новые технологии. 2008. № 6. С. 30–36.

2. Хорошев Н.И. Интеллектуальная поддержка принятия решений при эксплуатации энергетического оборудования на основе адаптивного кластерного анализа // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3 (31). С. 123–128.
3. Лежнюк П.Д., Нагул В.И., Нетребский В.В. Метод та алгоритм оптимального керування режимами ЕЕС на підставі принципу найменшої дії // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2012. № 3 (102). С. 85–88.
4. Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2016. № 4. С. 44–54.
5. Дунаев М.П., Дунаев А.М. Разработка экспертной системы для наладки преобразователя частоты // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 12 (83). С. 263–270.
6. Бабунашвили М.К., Бермант М.А., Руссман И.Б. Оперативное управление в организационных системах // Экономика и математические методы. 1971. Том.VII, вып. 3. С. 377–388.
7. Голубцов Н.В. Управление инновациями в энергетике: проблема подготовки кадров // Экономическое возрождение России. 2010. № 3. С. 121–126.
8. Marshirov V.V., Marshirova L.E. Methods of configuring the decision-making system when choosing and supporting an entity development strategy // Business Informatics. 2015. №4 (34). Pp. 47–54.
9. Коптелова И.А., Арванитакис Н.В. Теория принятия решений в задачах повышения энергоэффективности систем энергоснабжения // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 2(14). С. 35–40.
10. Власов В.А., Карпов А.Е., Копаница Д.Г., Ласковенко А.Г., Ласковенко Г.А. К вопросу о моделировании жизненного цикла зданий и сооружений повышенной ответственности на основе процессного метода // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 5(58). С. 161–166.
11. Дорошенко В.А., Друк Л.В., Герасимов А.Э. Математическое описание взаимовлияния технических средств распределенных по уровням систем управления с обратными связями // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2017. Т. 21. № 1. С. 118–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-118-124.

Авторы публикации

Голубцов Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Фёдоров Олег Васильевич – д-р техн. наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

References

1. Golubtsov N.V., Komyshanov O.P. Ratsionalizatsiya operativnogo upravleniya puskonladochnymi rabotami na stroyashchikhsya teplovykh elektrostantsiyakh // Novye tekhnologii. 2008. № 6. S. 30–36.
2. Khoroshev N.I. Intellektual'naya podderzhka prinyatiya reshenii pri ekspluatatsii energeticheskogo oborudovaniya na osnove adaptivnogo klasternogo analiza // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2016. № 3 (31). S. 123–128.
3. Lezhnyuk P.D., Nagul V.I., Netrebs'kii V.V. Metod ta algoritm optimal'nogo keruvannya rezhimami EES na pidstavi printsipu naimenshoi dii // Visnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu. 2012. № 3 (102). S. 85–88.

4. Pavelko V.I., Slepov M.T., Khairtdinov V.U. Opyt provedeniya kompleksnykh izmerenii s ispol'zovaniem raznorodnykh sistem na razlichnykh etapakh puska energobloka VVER-1200 // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Yadernaya energetika. 2016. № 4. S. 44–54.

5. Dunaev M.P., Dunaev A.M. Razrabotka ekspertnoi sistemy dlya naladki preobrazovatelya chastoty // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. № 12 (83). S. 263–270.

6. Babunashvili M.K., Bermant M.A., Russman I.B. Operativnoe upravlenie v organizatsionnykh sistemakh // Ekonomika i matematicheskie metody. 1971. Tom.VII, vyp. 3. S. 377–388.

7. Golubtsov N.V. Upravlenie innovatsiyami v energetike: problema podgotovki kadrov // Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii. 2010. № 3. S. 121–126.

8. Marshirov V.V., Marshirova L.E. Methods of configuring the decision-making system when choosing and supporting an entity development strategy // Business Informatics. 2015. №4 (34). Pp. 47–54.

9. Koptelova I.A., Arvanitaki N.V. Teoriya prinyatiya reshenii v zadachakh povysheniya energoeffektivnosti sistem energosnabzheniya // Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2016. № 2(14). S. 35–40.

10. Vlasov V.A., Karpov A.E., Kopanitsa D.G., Laskovenko A.G., Laskovenko G.A. K voprosu o modelirovanii zhiznennogo tsikla zdaniy i sooruzheniy povyshennoi otvetstvennosti na osnove protsessnogo metoda // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2016. № 5(58). S. 161–166.

11. Doroshenko V.A., Druk L.V., Gerasimov A.E. Matematicheskoe opisanie vzaimovliyaniya tekhnicheskikh sredstv raspredelennykh po urovnym sistem upravleniya s obratnymi svyaziyami // Lesnoi vestnik / Forestry Bulletin. 2017. T. 21. № 1. S. 118–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-118-124.

Authors of the publication

Nikolay V. Golubtsov – cand. sci. (techn.), associate professor, Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev.

Oleg V. Fedorov – dr. sci. (techn.), professor, Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev.

Поступила в редакцию

17 сентября 2017 года.

ВНЕПИКОВОЕ ОПРЕСНЕНИЕ ВОДЫ НА БАЗЕ ОТБОРНОГО ПАРА ЭНЕРГООБЛОКОВ АЭС С ВВЭР

В.А. Хрусталеv, В.М. Сучков

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1630-926X>, khroustalevva@mail.ru

Резюме: В статье рассматривается комбинирование атомной электростанции с водородными реакторами (ВВЭР) и дистилляционной опреснительной установкой с горизонтально-трубным пленочным испарителем (ДОУ ГТПИ), их совместный режим работы в периоды покрытия провалов графиков электрической нагрузки и термоэкономическая эффективность. Представлены ряд преимуществ по сравнению с другими методами опреснения, технические характеристики и стоимость ДОУ ГТПИ выпускаемого ряда в России с учетом неключенных затрат (строительные работы, работы по подводу морской воды, электроэнергии, отводу рассола, дистиллята). Такой энергокомплекс позволяет повысить КИУМ ядерного реактора, а также решить проблему нехватки пресной воды. Термоэкономическую эффективность данного энергокомплекса можно определить как полным, так и упрощенным алгоритмом с помощью введения "термоэкономического индекса". При этом многопродуктовый энергокомплекс с отбором пара от турбины АЭС на ДОУ ГТПИ следует сравнить с вариантом работы от специальных паровых котельных установок (КУ). При анализе результатов расчетов по упрощенному алгоритму на основе термоэкономического индекса заметно влияние фактора стоимости дистиллята на рынке, а также меньшая эффективность работы опреснительной установки, питаемой паром от КУ, чем от отбора пара от АЭС, особенно при увеличении числа часов работы ДОУ ГТПИ.

Ключевые слова: атомная электростанция, опреснение воды, опреснительная установка, чистый дисконтированный доход, термоэкономический индекс.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-23-35

OFF-PEAK WATER DISPERSAL BASED ON STEAM SELECTING OF NPP ENERGY BLOCKS WITH PWR

V.A. Khroustalev, B.M. Suchkov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Saratov, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1630-926X>, khroustalevva@mail.ru

Abstract. The article considers the combination of a nuclear power plant (NPP) with water-cooled water reactors (WCWR) and a distillation desalination plant (DDP) with a horizontal-tube film evaporator (HTFE), their joint operation during periods of covering the dips of electric load schedules and thermo-economic efficiency. A number of advantages are presented in comparison with other methods of desalination, technical characteristics and cost of the DDP with a HTFE of made in Russia series, taking into account the costs not included (construction works, work on sea water supply, electric power, brine distillate, distillate). Such an energy complex makes it possible

to increase the capacity factor of a nuclear reactor, as well as to solve the problem of lack of fresh water. The thermo-economic efficiency of this energy complex can be determined both by the complete and simplified algorithm by introducing the "thermo-economic index". Wherein the multi-product energy complex with steam supply from the turbine of the nuclear power plant to the DDP with HTFE should be compared with the version of work from special steam boiler plants (SBP). When analyzing the results of calculations using a simplified algorithm based on the thermo-economic index, the effect of the distillate cost factor on the market is noticeable, as well as the less efficient operation of the desalination plant fed with steam from the SBP as opposed to the steam extraction from the nuclear power plant, especially with increasing the number of hours of operation of the DDP of the HTFE..

Key words: nuclear power station, water desalination, desalination plant, net present value, thermoeconomic index.

В настоящее время в связи с быстрым развитием промышленности непрерывно увеличивается потребление технической и питьевой воды. Уровень водопотребления вырос настолько, что в некоторых маловодных районах мира местных ресурсов уже не хватает для покрытия возрастающих потребностей (особенно относится к таким странам Ближнего Востока и Африки). Поэтому развитие технологий опреснения морской воды является серьезной обещающей альтернативой. Но следует отметить, что процесс опреснения воды требует большого количества энергии, соответственно рост опреснения морской воды приведет и к серьёзному увеличению энергопотребления [1,11].

Для пополнения водных ресурсов предлагается использовать технологии опреснения воды: мембранные (электродиализ, обратный осмос) или термодистилляционные (установки на базе испарителей с естественной циркуляцией, принудительной циркуляцией, установки мгновенного вскипания, дистилляционно-опреснительные установки с горизонтально-трубным плёночным испарителем, работающие под вакуумом, а также с вертикально-трубным испарителем).

Например, электродиализ целесообразно применять для опреснения слабоминерализованных и сточных вод, концентрирования рассолов и получения из них кислот и щелочей. Но в то же время применение их на ТЭС или АЭС невозможно, так как нужны установки большой единичной мощности с бессточными схемами, а также из-за проблем, возникающих в процессе их эксплуатации. Более подробно о работе, преимуществах и недостатках каждого вида установок сказано в [1, 12, 13]. Вместе с тем использование опреснительных установок с горизонтально-трубным плёночным испарителем, в сравнении с другими установками, имеет ряд преимуществ:

- 1) широкий диапазон работы испарителя по рабочему давлению;
- 2) малая металлоёмкость;
- 3) получаемый дистиллят имеет температуру, близкую к температуре воздуха (среднегодовой для жаркого климата);
- 4) стабильность и высокий уровень качества получаемого дистиллята, обусловленные малыми объёмами перерабатываемой жидкости, находящейся в аппарате, и, тем самым, исключаемость многих вредных последствий (например, при переходе с одного режима на последующий);
- 5) простота конструкции и компактность.

Ниже, в табл.1 и табл. 2 представлены технические характеристики и стоимость выпускаемых ДОУ ГТПИ в России (приведены данные по установкам малой, средней и высокой производительности [8].

Стоимость собственно ДОУ ГТПИ и дополнительного оборудования станции подготовки питьевой воды (СППВ) определена укрупненно по методике завода ЗАО НПП “МАШПРОМ”.

Таблица 1.

Технические характеристики ДОУ ГТПИ (производство РФ)			
Характеристика	ДОУ-50	ДОУ-400	ДОУ-700
Дистиллят:			
производительность, м ³ /ч	50	400	700
массовая концентрация солей, мг/л	1–10	1–10	1–10
давление, МПа	0,4	0,4	0,6
Пар:			
для осуществления опреснения:			
давление, МПа	0,15–1	0,15–1,4	0,15–1,4
расход, т/ч	3,5	26	45,0
для создания и поддержания вакуума:			
давление, МПа не менее	0,6	1,0	1,0
расход, т/ч	0,3	1,5	3,3
Габариты установки:			
длина, м	15,0	21,0	38,0
ширина, м	5,0	26,0	26,0
высота, м	7,4	21,0	28,0

В связи с расширением географии сооружения новых АЭС с ВВЭР в страны с жарким климатом и малым запасом пресных вод (“Кудан-Кулам” Индия, “Аккуйю” Турция, “Руппор” Бангладеш, “Бушер” Иран, Иордания, Египет, Саудовская Аравия и т.д.) уже сейчас следует проанализировать условия экономичности подключения к отборам ПТУ АЭС мощных ДОУ ГТПИ.

Тем более что в СССР и РФ накоплен реальный опыт эффективного использования атомной энергии с целью опреснения малосоленых вод Каспийского моря при подготовке промышленного дистиллята для технических целей и на станции СППВ – для питьевых нужд (г. Шевченко, Шевченковская АЭС с БН-350 со станциями опреснения и кондиционирования дистиллята).

Отметим, что окончание эксплуатации Шевченковской АЭС не имело никаких причинных связей с какими-либо технологическими трудностями, но скорее со старением оборудования ядерной части Шевченковского энергокомплекса, а также с возникновением трудностей при передаче собственности новым субъектам (Казахстан).

Городская ТЭЦ обеспечивала отборным паром опреснительные установки – «Самовары», которые, в свою очередь, с расходом 120 000 м³/сутки (или 5000 м³/час) пресной водой снабжали как г. Шевченко (ныне Актау) с населением почти 170 000 чел. (данные на 1991 год), так и Прикаспийский горно-металлургический комбинат по добыче и переработке урановой руды. Добыча руды выполнялась открытым способом, что резко снижало ее себестоимость. Комбинат был принят государственной комиссией в эксплуатацию 16 января 1945 г. Впоследствии для опреснения морской воды Каспия была сооружена атомная ТЭЦ с РУ типа БН-350. В турбинах АЭС свежий пар расширялся не до давления в конденсаторе, как на обычных конденсационных АЭС, а до давления 0,7 МПа, и затем весь пар направлялся на «Самовары», то есть были установлены противодавленческие турбины. Если как на одного жителя города приходилось в час более 29 литров пресной воды (при норме для жаркого климата – 14,75 л/час), то отсюда следует, что опреснительная установка была рентабельна и необходима для города Шевченко.

Таблица 2

Стоимость опреснительной установки с учетом затрат (уровень цен 2016г.)

Наименование	Стоимость комплект. установки, млн. руб.	Разработка тех. докум., тран. расходы и монтаж, млн. руб.	Пуско-наладочные работы, млн. руб.	Итого, млн. руб.	Итого с невл. затр. в 20%, млн.руб	Итого с невл. затр. в 70%, млн.руб
1	2	3	4	5	6	7
ДОУ-50	48,0	34,3	3,0	85,3	102,36	145,01
ДОУ-400	450,0	296,0	7,5	753,5	904,2	1280,95
ДОУ-700	725,0	398	8,5	1131,5	1357,8	1923,55
СППВ-50	7,5	8,05	0,8	16,35	19,62	27,78
СППВ-400	80,0	44	1,2	125,2	150,24	212,84
СППВ- 700	110,0	60	1,2	171,2	205,44	291,04
ДОУ- 50+ СППВ-50	55,5	40,6	3,8	101,65 (2,03)*	121,98 (2,44)	172,81 (3,46)
ДОУ- 400+ СППВ-400	530,0	340	8,7	878,7 (2,20)	1054,44 (2,64)	1493,79 (3,73)
ДОУ- 700+ СППВ-700	835,0	458	9,7	1302,7 (1,86)	1563,24 (2,23)	2214,59 (3,16)
*В скобках указана удельная стоимость опреснительной установки на кубический метр производимого дистиллята.						

При многообразии условий уже выигранных по тендеру площадок для сооружения АЭС российской архитектуры за рубежом необходимо рассматривать как оптимистичный (колонка 6), так и пессимистичный (колонка 7) варианты, уточняя результат по критерию Сэвиджа (при наличии достаточно достоверных данных):

$$\Delta \mathcal{E} = \alpha \Delta \mathcal{E}_{\max} + (1 - \alpha) \Delta \mathcal{E}_{\min}, \quad (1)$$

где α – вероятность верхней и нижней оценки стоимостей ДОУ ГТПИ.

В выражении (1) под верхней оценкой стоимости следует понимать итоговый результат с невключенными затратами в ДОУ ГТПИ в 70%, под нижним – 20%.

Критерий Сэвиджа рекомендует в условиях неопределенности выбирать ту стратегию, при которой величина риска принимает наименьшее значение в самой неблагоприятной ситуации (когда риск максимален). Поскольку в данном случае наличие определенного риска вполне понятно (невключенные затраты, например, не могут быть на начальной стадии исследования заданы точно и т.д.).

Источником энергии для опреснительных установок кроме АЭС могут являться традиционные источники энергии. Однако в этих технологиях имеется ряд недостатков. Во-первых, непрерывный рост цен на органическое топливо, и особенно на газ. Во-вторых, значительное увеличение расходования энергии для целей опреснения вызовет дополнительное потребление нефти и газа и рост затрат на их транспорт, что тоже повлияет на рост цен на эти ресурсы.

Не следует забывать, что увеличение количества сжигаемого топлива ведет к увеличению выброса в атмосферу парниковых газов, что отрицательно сказывается на общемировой экологии (то есть на потеплении климата на Земле, что возможно, будет приводить к дальнейшему снижению запасов пресной воды).

В-третьих, многие описываемые технологии опреснения морских, солоноватых и соленых вод на сегодня недооценены по затратности. Это означает, что при расчётном “завышении” стоимости ДОУ ГТПИ, например, на поправку на невключенные затраты,

возрастает “поле устойчивости”, то есть позитивных результатов по оценке эффективности применения теплоты нерегулируемых отборов паротурбинных установок АЭС для целей опреснения.

Технология использования теплоты отборов АЭС для опреснения воды сегодня является, пожалуй, единственным, широкодоступным и относительно эффективным технологическим решением.

Тем более, это решение становится все более реальным в связи с вышеперечисленными ранее в статье уже достоверно утвержденными площадками АЭС с РУ российской архитектуры в целом ряде жарких стран с малым запасом пресных вод. Отметим, что в предварительных соглашениях по ряду южных площадок Заказчиком предварительно заявлены в составе АЭС установки ДООУ ГТПИ.

Использование опреснительных установок для атомных электростанций позволяет решать задачи не только широкомасштабного водоопреснения, но и таких частных внутрестанционных задач, как очистка брызгального бассейна (ББ), подготовка добавочного конденсата, а при наличии теплофикационной установки (ТФУ), подготовка сетевой воды (особенно при открытой системе теплоснабжения). Попутно с решением этих задач [2]:

- 1) повышается КИУМ ядерного реактора (по тепловой мощности) при одновременном участии энергоблока АЭС в покрытии переменной части графика нагрузки;
- 2) на базе теплофикационного потока производится дистиллят и снижаются потери в конденсаторе;
- 3) с применением ДООУ ГТПИ малой мощности сравнительно малозатратно достигается подпитка изолированного “брызгального бассейна” для целей охлаждения реакторной системы (патент СГТУ №2285808) [7] (рис.1).

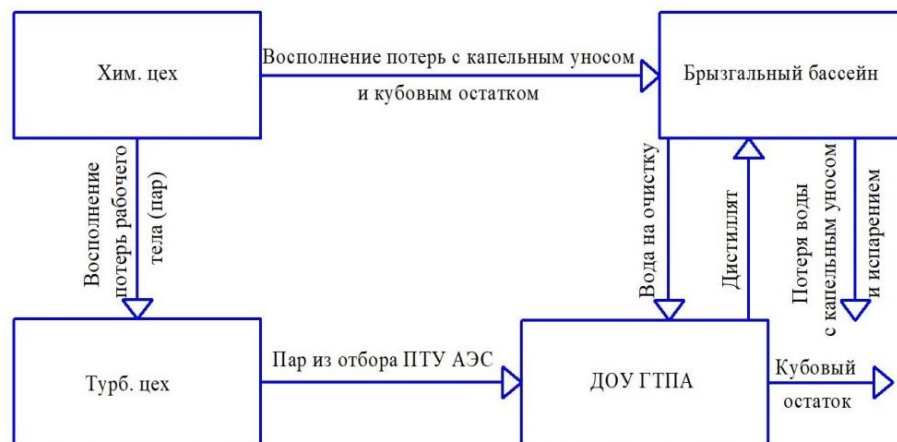


Рис. 1. Принципиальная схема продувки брызгального бассейна РУ АЭС

Данная схема работает следующим образом: отборный пар от АЭС и вода на очистку из брызгального бассейна поступают на опреснительную установку. В процессе работы установки помимо основного продукта дистиллята (отборный пар также преобразуется в дистиллят), выделяется кубовый остаток (соленая вода). Дистиллят направляется далее в брызгальный бассейн, а кубовый остаток проходит последующую термообработку до полного упаривания. С помощью химцеха компенсируется потеря только рабочего тела (пар) в турбинном цехе (возвращение рабочего тела от опреснительной установки обратно в турбинный цех возможно в виде чистого конденсата). Брызгальный бассейн является источником радиоактивности, а также потерь с капельным уносом и кубовым остатком,

поэтому для восполнения воды в ББ следует использовать отдельно работающую ДОУ ГТПА малой производительности. Поэтому можно пренебречь инфильтрацией воды через дно бассейна в связи с уплотнением его дна.

Отметим, что достаточный мировой опыт охлаждения конденсаторов АЭС морской циркуляционной водой на сегодня уже имеется. Однако для восполнения рабочего тела мощности химцеха может оказаться недостаточно. Это имеет место, когда отборный пар на ДОУ ГТПИ переносит свою стоимость, в конечном счете, на стоимость дистиллята и питьевой воды при широкомасштабном их производстве.

При расчете турбины К-1200-6,8-3000 для суточного графика нагрузок были построены расходно-энергетические характеристики в условиях подключения к нерегулируемым отборам опреснительных установок. В расчетах учитывалось изменение КПД блока АЭС при различных задаваемых энергетических и тепловых нагрузках. Рассмотрим пример совмещения суточного графика электрической нагрузки с работой ДОУ-700 (рис. 2), то есть заполнение ночного провала графика тепловой нагрузки РУ нагрузкой опреснения – выработкой пресной воды в бездефицитные часы графика. При этом не только “дозаполняется” график тепловой мощности РУ, но и улучшается экономичность выработки электроэнергии в ночной период, частично осуществляемой в этом случае на тепловом потреблении.

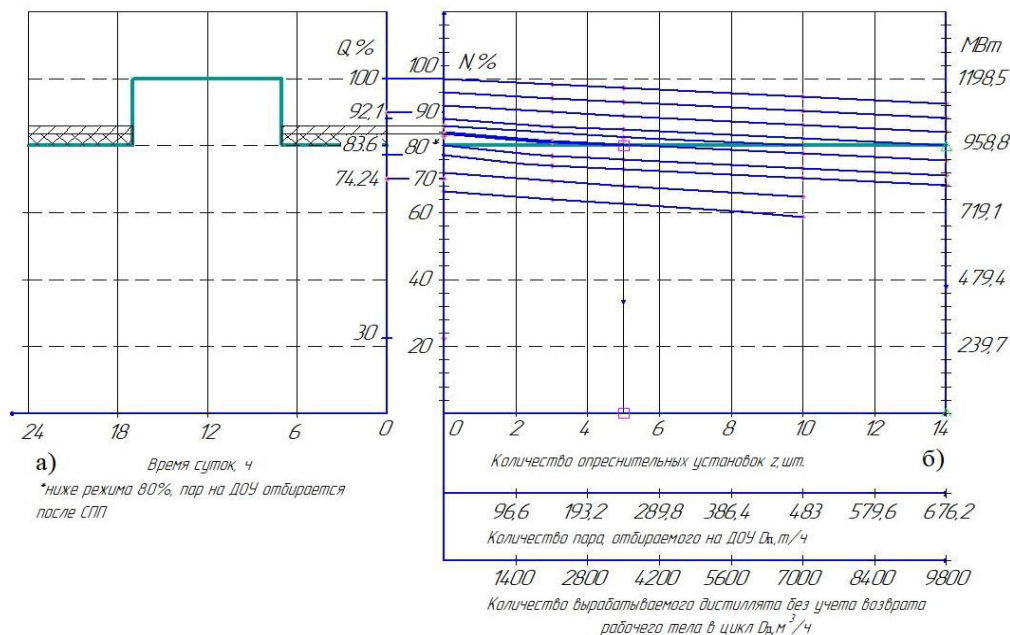


Рис. 2. Работа турбины К-1200-6,8-3000 по задаваемому суточному графику (а) и режимная диаграмма (расчет) снижения мощности при отпуске тепла на ДОУ ГТПИ (б)

Как пример расчета и “ключ” к использованию диаграммы (рис. 2, б) показано сопоставление двух энергетически сопоставляемых проектов, включающих действующую АЭС по диспетчерскому графику: днем – 100% $N_{ном}$, ночью – 80% $N_{ном}$ и работающую на опреснение воды ДОУ одинаковой суммарной производительностью по дистилляту (ДОУ ГТПИ-700). Но в первом случае ДОУ питается от нерегулируемого отбора пара ПТУ АЭС, во втором – от группы паровых котельных на газовом топливе. В первом случае (в работе 5 ДОУ ГТПИ) в период провала, обеспечивая заданную электрическую мощность $N=80\%$ и отбор на ДОУ, необходимо поддерживать более высокую мощность РУ от $Q_{ру}=83,5\% Q_{ном}$

до $Q_{\text{ру}}=86,6\% Q_{\text{ном}}$, то есть рост среднегодового значения КИУМ по тепловой мощности ядерного реактора увеличивается с 0,904 до 0,922.

Для пояснения процедуры сопоставления двух вариантов в условиях требования равного их энергетического эффекта предложена следующая блок-схема (рис.3).

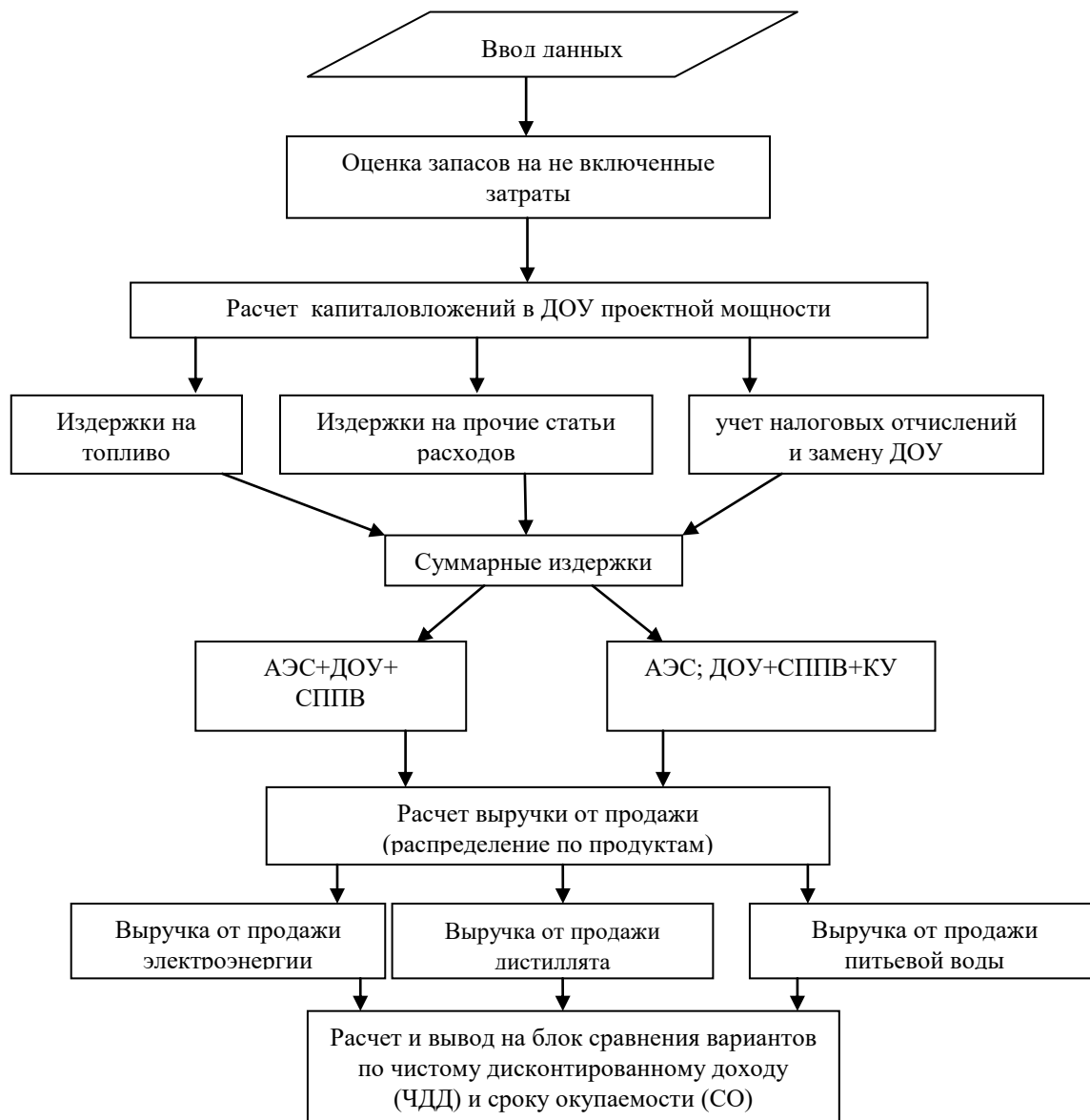


Рис.3 Блок-схема расчета и сравнения технико-экономических показателей проектов
1– АЭС+ДОУ+СППВ; 2– АЭС; ДОУ+СППВ+КУ

В [3, 4] показано, что в данной ситуации для экспресс-анализа и нахождения лучшего варианта можно применить упрощенный алгоритм, который назван методикой предварительной оценки эффективности на основе термoeкономического индекса.

Это становится возможным, когда в обоих проектах одинаковы затраты в основную и дополнительную часть оборудования (АЭС и ДОУ), а изменяются затраты на топливо и тарифы на вырабатываемые продукты.

Возможность варьировать валовую прибыль от продажи электроэнергии по суточному тарифному меню, а также цену за дистиллят и питьевую воду в зависимости от региона по уравнению термоэкономического индекса (2) [3]:

$$\eta_{т/э}^{(1)} = \frac{\bar{\tau}_{пр} (N_{пр} \Pi_{ээ}^{пр} + z(1 - \alpha_{пв})(D_{д} - D_{п})\Pi_{дв} + z\alpha_{пв}(D_{д} - D_{п})\Pi_{пв}) + \bar{\tau}_{баз} N_{баз} \Pi_{ээ}^{баз}}{(Q_p^{баз} \bar{\tau}_{баз} + Q_p^{пр} \bar{\tau}_{пр}) \frac{\Pi_{я}}{q_{я}} + D_{п} z_{хц}} \quad (2)$$

Здесь $\bar{\tau}_{баз}$, $\bar{\tau}_{пр}$ – относительные периоды (в расчете на 1ч) работы энергоблока АЭС с включенными ДОУ ГТПИ ($\bar{\tau}_{пр}$) и при работе только на генерацию электроэнергии ($\bar{\tau}_{баз}$), нормированную на единицу; $\Pi_{ээ}^{пр}$, $\Pi_{ээ}^{баз}$ – отпускные тарифы на электроэнергию с шин АЭС в провальный и базовый период, руб./МВт*ч; $N_{пр}$, $N_{баз}$ – электрическая мощность турбины в часы провала и в базовом режиме соответственно, МВт; $Q_p^{баз}$, $Q_p^{пр}$ – тепловая мощность РУ в базовой части графика, а также в провальной его части с учетом отпуска пара из отбора ПТУ АЭС на присоединенных ДОУ ГТПИ, МВт(т); $\alpha_{пв}$ – количество дистиллята для переработки в питьевую воду (принимается в зависимости от требований в заданном регионе); $D_{д}$ – выработка дистиллята ДОУ, т/ч; $D_{п}$ – количество отбираемого пара на ДОУ, т/ч; $\Pi_{дв}$, $\Pi_{пв}$ – отпускная цена на дистиллированную воду и питьевую воду, руб./т; $\Pi_{я}$ – стоимость ядерного горючего, руб./кг UO_2 ; $q_{я}$ – теплотворная способность ядерного горючего (1200 МВт*ч/кг UO_2), принимаемая на основе данных по выгоранию топлива В (МВт*сут./ кг UO_2) в РУ [14]; $z_{хц}$ – удельные ожидаемые затраты в подготовку рабочего тела (дистиллят) в химцехе, руб./т; z – принятое количество опреснительных установок, шт.

Для такой же технологии опреснения в ДОУ ГТПИ, но с использованием пара на ДОУ от специальной паровой котельной (в данном примере считаем, что паровая котельная необходимой мощности в данном регионе имеется) формула для $\eta_{т/э}^{(2)}$ второго варианта будет отличаться только лишь затратной частью, то есть знаменателем. При этом следует учесть затраты на газовое топливо для котельной (в экспортных ценах) и снижение тепловой мощности РУ при работе в провальной части без нагрузки по пару для ДОУ (числитель из формулы (2) обозначим – К):

$$\eta_{т/э}^{(2)} = \frac{K}{(Q_p^{баз} \bar{\tau}_{баз} + Q_p^{пр} \bar{\tau}_{пр}) \frac{\Pi_{я}}{q_{я}} + D_{п} z_{хц} + Q_{доу} \bar{\tau}_{пр} \frac{\Pi_{г}}{q_{г}}} \quad (3)$$

где $Q_{доу}$ – тепловая мощность РУ АЭС в провальной части без подключенных опреснительных установок, МВт(т); $\Pi_{г}$ – экспортная цена газа, руб./м³; $q_{г}$ – теплотворная способность газа в КУ.

Для расчета термоэкономического индекса для второго варианта принималось: теплотворная способность газа в КУ с учетом КПД котла $q_{г} = 31,5$ МДж/м³, или 0,00875 МВтч/м³; экспортная цена на газ оценивалась в диапазоне 250–350 \$ США за 1000 м³ газа, или 14,5–20,3 руб./м³ [14].

Для расчетов по более полному алгоритму, представленному в блок-схеме (рис. 3), основной показатель, который будет влиять на термоэкономическую эффективность – издержки на топливо, определяются по формуле [4]:

$$И_{\text{Т}}^{\text{АЭС}} = \frac{N_{\text{Т}} \tau_{\text{э}}}{24B \frac{0,123}{b_{\text{э}}}} \cdot \Pi_{\text{АЭС}}, \quad (4)$$

$$И_{\text{Т}}^{\text{КУ}} = Q_{\text{доу}}^{\text{год}} \cdot b_{\text{рк}} \cdot \Pi_{\text{газ}} \quad (5)$$

Чтобы показать термоэкономическую эффективность сравниваемых проектов, применим показатели чистого дисконтированного дохода и дисконтируемого срока окупаемости [4]:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \alpha_t - K_0. \quad (6)$$

При ЧДД=0 определяется срок окупаемости.

Для расчета термоэкономического индекса принимался одинаковый временной график производства воды в обоих сопоставляемых вариантах. Для двухпродуктовых энергокомплексов сопоставление с соблюдением равного энергетического эффекта следует провести с учетом достижения заранее оптимальности каждого из них. В этом случае можно отказаться от требования сопоставимости временных графиков производства второго продукта – пресной воды, оставив это требование только для электроэнергии, как нескладируемого продукта, потребляемого, к тому же, по тарифному меню, зависящему от времени. Тогда второй вариант можно предварительно улучшить, выровняв его с 1-ым только по общему объему опреснения воды, распределив её производство равномерно в течение суток.

В табл. 3 приведены результаты расчетов по упрощенному и более правильному полному алгоритму сопоставления вариантов.

Таблица 3

Технико-экономические показатели вариантов

Число часов работы опреснительной установки, час/сутки		6	10	14	24		
Варианты сравнения*		5 ДОУ-700 (АЭС)			А	Б	В
Термоэконом. индекс	$\Pi_{\text{д}}=100$	13,13	13,29	13,46	9,2	7,7	6,59
	$\Pi_{\text{д}}=300$	14,03	14,83	15,68	9,84	8,6	7,68
	$\Pi_{\text{д}}=500$	14,94	16,38	17,90	10,47	9,49	8,76
Тепловая мощность, МВт/сутки		1082,25	1787	2553,6	1082,25	1787	2533,6
Капвложения, млн.руб.	в ДОУ	7816,2			2090,46	3248,46	4689,72
	в РК				118,92	191,1	276,64
	общее				2209,38	3439,56	4966,36
Расход топлива	кг я.т./сутки	0,4737	0,7895	1,1053			
	кг газ/сутки				66594,5	109971,7	157144,6
Издержки на топливо, млн.руб.		12,62	21,04	29,45	243,1	669,0	1338,4

Продолжение таблицы 3

Себестоимость дистиллята, руб./м ³		132,8	80,98	58,85	158,59	138,04	129,28
Укрупненный срок окупаемости $CO=(K_{опр}+I_T)/$ ЧП, лет	$\Pi_d=100$	-	38,8	12,99	-	-	-
	$\Pi_d=300$	7,62	3,49	2,26	1,94	2,00	2,41
	$\Pi_d=500$	3,47	1,83	1,24	0,98	1,00	1,15
Чистый дисконтирован ный доход $E_{вн}=0,08$, млн.руб	$\Pi_d=100$	-	-	4218	-	-	-
	$\Pi_d=300$	9881	26189	42496	15803	25739	32434
	$\Pi_d=500$	26286	53530	80775	32208	53081	70712
Чистый дисконтирован ный доход $E_{вн}=0,1$, млн.руб	$\Pi_d=100$	-	-	1665	-	-	-
	$\Pi_d=300$	6308	19679	33049	12480	20367	25522
	$\Pi_d=500$	19758	42095	64433	25930	42783	56906
Чистый дисконтирован ный доход $E_{вн}=0,12$, млн.руб	$\Pi_d=100$	-	-	-	-	-	-
	$\Pi_d=300$	3790	15157	26524	10178	16646	20727
	$\Pi_d=500$	15225	34215	53206	21613	35705	47409
Срок окупаемости при учёте $E_{вн}=0,08$, лет	$\Pi_d=100$	-	-	15,78	-	-	-
	$\Pi_d=300$	9,92	5,73	4,2	3,98	3,88	4,15
	$\Pi_d=500$	5,76	3,98	2,49	2,96	2,89	2,98
Срок окупаемости при учёте $E_{вн}=0,1$, лет	$\Pi_d=100$	-	-	20,82	-	-	-
	$\Pi_d=300$	11,11	6,15	4,65	4,09	3,99	4,27
	$\Pi_d=500$	6,06	4,08	3,46	3,00	2,93	3,03
Срок окупаемости при учёте $E_{вн}=0,12$, лет	$\Pi_d=100$	-	-	-	-	-	-
	$\Pi_d=300$	13,09	6,2	4,73	4,2	4,1	4,4
	$\Pi_d=500$	6,39	4,18	2,5	3,04	2,97	3,07

Примечание: *В варианте А в работе находится 1 ДОУ-700 и 1 ДОУ-200 (которая находится на ТО 3 часа в сутки) для выравнивания вариантов по выработке дистиллята. В варианте Б в работе находится 2 ДОУ-700 и 1 ДОУ-50 (часть суток работает с увеличенной мощностью). В варианте В в работе находится 3 ДОУ-700 (одна из которых находится на ТО 2 часа в сутки).

Выводы

1. В условиях быстрого развития атомной энергетики и растущего спроса на энергоблоки АЭС российской архитектуры со стороны развивающихся стран сегодня следует повышать эффективность энергокомплексов АЭС с ВВЭР путем комбинирования с дистилляционными опреснительными установками для условий жаркого климата и маловодных местностей. По расчетам с 5 установками ДОУ ГТПИ выработка дистиллята равна $3250 \text{ м}^3/\text{ч}$, тогда как на Шевченковском энергокомплексе выработка была $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Однако, из рис. 2, б видно, что можно установить до 14 установок ДОУ ГТПИ, которые дадут выработку дистиллята $9100 \text{ м}^3/\text{ч}$.

2. При экспресс-анализе сравнения двух проектов видно, что у первого проекта термозаконономический индекс выше, чем у второго. Также у второго проекта при увеличении числа часов работы термозаконономический индекс падает (при цене за дистиллят $300 \text{ руб.}/\text{м}^3$, цене на газ $14,3 \text{ руб.}/\text{м}^3$ и 6 часах работы термозаконономический индекс составляет 9,84, а при 14 часах работы термозаконономический индекс составляет 7,61).

3. При более полном сравнении пять опреснительных установок, питаемые паром от АЭС, эффективнее при большем числе часов работы опреснительной установки в провале, чем питаемой паром от КУ. Но при меньшем числе часов работы из-за высоких капложений в опреснительную установку работа установок от КУ эффективнее, чем от АЭС (то есть при работе установки 14 часов в провале от АЭС показатель ЧДД выше, но меньше срок окупаемости по сравнению с работой установки от КУ). Поэтому в конкретном случае необходимо рассматривать уточненные исходные данные для выбора наиболее выгодного варианта совместного энергоснабжения и производства пресной воды.

Литература

1. Колодин М.В. Экономика опреснения воды. М.: Наука, 1985.
2. Зорин В.М. Атомные электростанции: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
3. Хрусталева В.А., Сучков В.М., Симонян А.А. Повышение эффективности АЭС в энергосистемах созданием на их основе комбинированных энергокомплексов // Совершенствование управления промышленной и экологической безопасностью производственных объектов в свете новых правил и нормативных правовых актов. Саратов: СГТУ, 2016.
4. Рогалева Н.Д., Зубкова А.Г., Мастерова И.В. Экономика энергетики: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
5. Клименко А.В., Зорина В.М. Теплоэнергетика и теплотехника: Справочная серия. - 4 изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
6. Евсюкова К.А., Иноземцев И.В. Современные проблемы опреснения морской воды // Современные проблемы гуманитарных и общественных наук. 2014. №2. с. 52–55.
7. Способ работы охлаждающей системы тепловых и атомных электростанций с водоёмами-охлаждителями: пат.2285808 Рос. Федерация: МПК F01D 25/08 G21C 15/18 / В.А. Хрусталева, В.Л. Подберёзный, В.А. Писанец; заявитель и патентообладатель Саратовский Государственный Технический Университет(СГТУ).- № 2005100230/06; заявл. 11.01.2005; опубл. 20.10.2006, Бюл. №29.- 6с.
8. Установки дистилляционные опреснительные горизонтально-трубные пленочные. ЗАО НПП "МАШПРОМ", Екатеринбург, 2004.
9. Баклушин Р.П. Эксплуатационные режимы АЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

10. Десятов А.В., Колесников А.В., Якушин Р.В., Попель О.С. Автономные установки для опреснения морской воды с применением возобновляемых источников энергии // Вода: химия и экология. 2014. Том 12, №77. С. 34–40.
11. Дефицит пресной воды // <http://thewallmagazine.ru/> URL: <http://thewallmagazine.ru/lack-of-fresh-water/>.
12. Мелинова Л.В. Исследование, разработка и совершенствование термодистилляционных опреснительных установок для энерготехнологических комплексов : дис. канд. техн. наук: 05.14.01. М., 2004.
13. IAEA TECDOC-574. “Use of Nuclear Reactors for Seawater Desalination”. Vienna, 1990.
14. Региональная эффективность проектов АЭС / Басов В.И., Хрусталева В.А., Ипатов П.Л. и др. М.: Энергоатомиздат, 2005.

Авторы публикации

Хрусталева Владимир Александрович – докт. техн. наук, профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Сучков Владимир Михайлович – аспирант кафедры «Тепловая и атомная энергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

References

1. Kolodin M.V. Economics of desalination of water. M.: Science, 1985.
2. Zorin V.M. Nuclear power plant: study guide.–M.: Publishing house MPEI, 2012.
3. Khrustalev V.A., Suchkov V.M., Simonyan A.A. Improving the efficiency of nuclear power plants in power systems, creation on their basis of combined energy systems // Improving of the management of industrial and environmental safety. Saratov.:SSTU, 2016
4. Rogalev N.D., Zubkova A.G., Masterova I.V. Energy economics: guide for high school. M.: Publishing house MPEI, 2011.
5. Klimenko A.V., Zorin V.M. Thermoenergy and thermotechnics: Reference series. M.: Publishing house MPEI, 2007.
6. Evsykova K.A., Inozemtsev I.V. Modern problems of sea water desalination// Modern problems of the humanities and social sciences. - 2014. - №2. - p. 52-55.
7. Patent 2285808 (RU). МПК F 01D 25/08. Method for operation of cooling system for thermal and nuclear power stations with cooling water bodies / V. A. Khrustalev, V. L. Podbereznyj, V.A. Pisanets // Date of publication: 20.10.2006. Bull. № 29.
8. Horizontal-tube film desalination plants JSCSPE “MASHPROM”, Ekaterinburg, 2004.
9. R.P. Baklushin Exploitation modes of NPP.–M.: Publishing house MPEI, 2011.
10. A.V. Desyatov, A.V. Kolesnikov, R.V. Yakushin, O.S. Popel Autonomous units for desalination of sea water using renewable energy sources // Water: chemistry and ecology. - 2014. – tom 12, №77–p.34-40
11. Lack of freshwater // <http://thewallmagazine.ru/> URL: <http://thewallmagazine.ru/lack-of-fresh-water/>
12. Melinova L.V. Research, development and improvement of thermal distillation desalination plants for energy technology complexes: dis. cand. eng. sciences: 05.14.01. - M., 2004.
13. IAEA TECDOC-574. “Use of Nuclear Reactors for Seawater Desalination”. Vienna, 1990.
14. Regional efficiency of NPP projects / Basov V.I., Khrustalev V.A., Ipatov P.L. и др. - М.: Energoatomizdat, 2005.

Authors of the publication

Vladimir A. Khrustalev – doctor of tech. sciences, professor of the Department of Thermal and Nuclear Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

©В.А. Хрусталев, В.М. Сучков

Vladimir M. Suchkov – postgraduate student of the Department of Thermal and Nuclear Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Поступила в редакцию

20 марта 2018 г.

**СОЗДАНИЕ ГИБРИДНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КРАТКОВРЕМЕННЫХ
НАРУШЕНИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

К.Р. Бахтеев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: orcid.org/0000-0002-4478-4121, kam1609@mail.ru

Резюме: В статье проведен сравнительный анализ различных типов накопителей электроэнергии. Обосновывается возможность применения гибридного накопителя электроэнергии на базе аккумуляторных батарей и суперконденсаторов большой мощности для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения, вызываемых замыканиями в сетях внешнего электроснабжения. Построена имитационная модель аккумуляторной батареи большой мощности, батареи суперконденсаторов и гибридного накопителя электроэнергии для выбора оптимального решения данной проблемы и оценки эффективности данного метода.

Ключевые слова: математическое моделирование, электрические сети, суперконденсаторы, аккумуляторные батареи, остаточное напряжение, качество электроэнергии, провал напряжения.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-36-44

**CREATION OF A BIG POWER HYBRID ELECTRIC ENERGY STORAGE FOR
PREVENTION SHORT-TERM INTERRUPTION OF POWER SUPPLY TO
INDUSTRIAL CONSUMERS**

K.R. Bakhteev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: orcid.org/0000-0002-4478-4121, kam1609@mail.ru

Abstract: The article gives a comparative analysis of different types of electricity accumulators. A possibility of using a hybrid electrical energy storage based on accumulator batteries and supercapacitors of high power is substantiated as one of the ways to prevent short-term power failures caused by short circuits in external power supply networks. Simulation models of the high power battery, supercapacitor battery and hybrid storage was constructed to evaluate the efficiency of this method.

Keywords: mathematical modeling, electrical networks, supercapacitors, batteries, residual voltage, power quality, voltage sag.

Высокая степень автоматизации и электрификации многих технологических процессов, появление многочисленных технологических циклов с тонкой настройкой сделали производственный процесс промышленных потребителей очень чувствительным к надежности системы электроснабжения и качеству электроэнергии [1]. Нарушение

технологического процесса, особенно в условиях непрерывного характера производства, может приводить к остановке производства, к браку и недоотпуску продукции, а также сопровождаться существенными экономическими потерями. Для ряда производств ущерб от кратковременных провалов напряжения (ПН) длительностью от 20 мс с учетом перезапуска технологических процессов сопоставим с ущербом от длительных перерывов питания, в то время как частота возникновения провалов напряжения выше на несколько порядков [2]. Как правило, ПН в системах внутреннего электроснабжения промышленных потребителей возникают из-за коротких замыканий (КЗ) на воздушных линиях в питающих сетях напряжением 110 кВ и выше. Из-за электрических связей между шинами распределительных устройств системообразующих подстанций снижение напряжения при КЗ распространяется на каждую секцию соответствующей главной понизительной подстанции, питающей промышленные предприятия, что делает неэффективной работу классического автоматического ввода резерва (АВР) 6 – 10 кВ [3]. В связи с этим возрастает интерес к применению накопителей электроэнергии для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) [2]. Наличие энергоемких и мощных накопителей в качестве промежуточных устройств между источниками генерации энергии и потребителем позволяет освободиться от жесткого требования ежечасного соответствия генерации энергии ее потреблению [4].

Целью исследования является выбор типа и емкости накопителей энергии, способных выдать суммарную мощность свыше 1 МВт, и обоснование экономической эффективности их применения для обеспечения бесперебойного питания как собственных подстанций, так и особо ответственных потребителей.

В качестве накопителей энергии в энергосистемах наиболее широко используются аккумуляторные батареи (АКБ) с различными типами электролитов, на основе которых формируют мощные системы накопления – аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ). Иными словами, АББМ представляет собой накопитель, который состоит из мощных АКБ различного типа, объединенных в пакеты [5, 6].

Проведенный анализ накопителей (а среди них были рассмотрены различные типы АКБ, характеризующиеся определенным составом и техническими характеристиками), позволил выделить те из них, которые в наибольшей степени пригодны для предотвращения ПН. Их характеристики представлены в таблице.

Таблица

Характеристики различных видов накопителей энергии

	Lead Acid	Li-ion	NiCd	NiMH	Ni-NaCl	СК
Емкость одного элемента	26–3000 А*ч	40–800 А*ч	10–1100 А*ч	0,3–7 А*ч	40–200 А*ч	500–12 000 Ф
Энергетическая плотность, Вт*ч/кг	30–60	80–160	45–80	60–120	140–190	1–10
Число циклов заряда/разряда	200–1200	700–3000	1500	300–500	3000–7000	>500 000
Устойчивость к перезаряду	Низкая	Средняя	Средняя	Низкая	Высокая	Очень высокая

Как видно из таблицы, наиболее пригодными для предотвращения ПН являются литий-ионные (Li-ion) и никель-солевые (Ni-NaCl) батареи, а также суперконденсатор (СК). Так, литий-ионная (Li-ion) и никель-солевая (Ni-NaCl) батареи имеют очень небольшой саморазряд, что очень выгодно отличает их от свинцово-кислотных или никель-кадмиевых / никель-металл – гибридных батарей, которым необходима периодическая подзарядка.

Проведенный анализ накопителей показал, что наиболее перспективными для применения в данной области являются литий-ионные батареи. Основным недостатком таких АКБ является ограничение по току разряда, поскольку непосредственно клеммы не могут передавать такой ток (хотя теоретически самому аккумулятору это под силу). На сегодняшний день максимальная единичная емкость АКБ данного типа составляет 1200 А*ч, а напряжение – 2 В [7]. С учетом этого была разработана имитационная модель АББМ (рис. 1.), состоящая из 420 АКБ емкостью 1200 А*ч и суммарным напряжением 840 В и стабилизатора, предназначенного для поддержания постоянного значения напряжения на выходе, которые работают на нагрузку от 250 кВт до 2 МВт. Основными задачами данной имитационной модели является определение времени отклика и разрядных характеристик АББМ [8, 9], поэтому нагрузка здесь имитируется упрощенно в качестве постоянного сопротивления. Что касается согласования параметров устройств и источника с сетью, то, исходя из проведенного технико-экономического расчета [7], было выбрано напряжение 840 В как наиболее оптимальное.

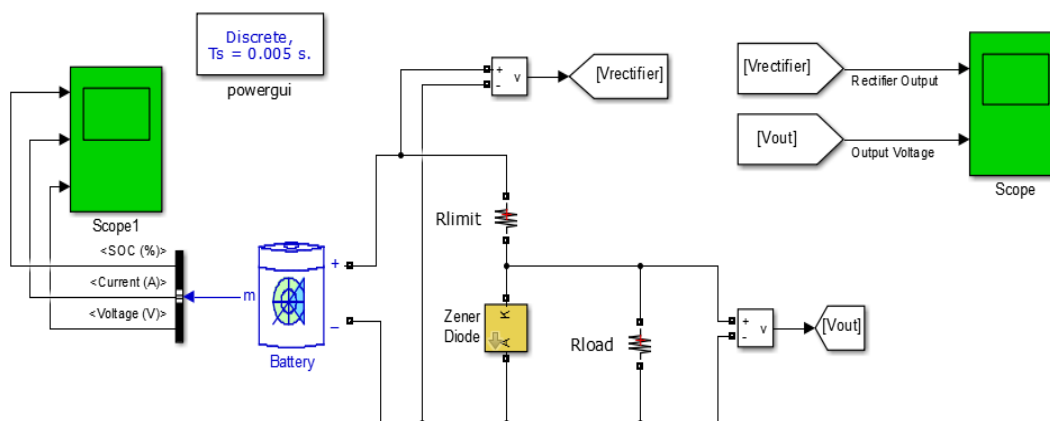


Рис. 1. Имитационная модель АББМ и стабилизатора напряжения

Допущения, принятые в модели АББМ (рис. 1.):

- Внутреннее сопротивление считается постоянным во время циклов заряда и разряда и не изменяется с амплитудой тока.
- Параметры модели получены из характеристик разряда, считаются одинаковыми и для зарядки.
- Саморазряд батареи не представлен. Его можно представить, добавив большое сопротивление параллельно клеммам аккумулятора.
- Аккумулятор не имеет эффекта памяти.
- Емкость аккумулятора не изменяется с амплитудой тока (эффект Пекерта).

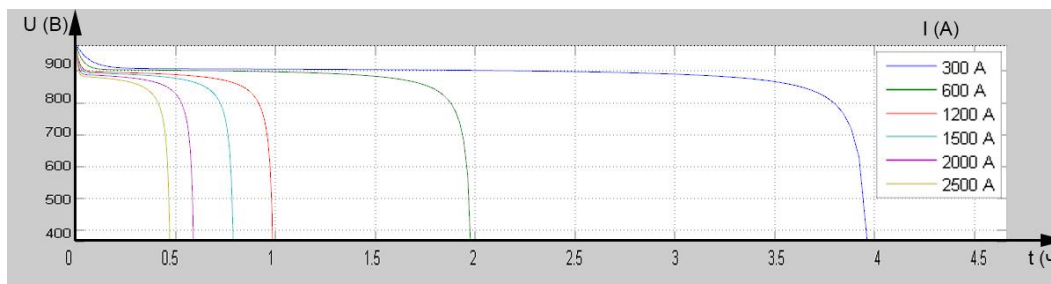


Рис. 2. Токоразрядные характеристики АББМ

Результаты эксперимента, приведенные на рис. 2, показывают, что ток разряда изменяется пропорционально мощности нагрузки от 300 до 1200 А, а время разряда АББМ обратно пропорционально увеличению нагрузки. Одной из особенностей АКБ, не отображенных на рис. 2, является то, что чем больше сила разрядного тока, тем ниже напряжение, до которого может разряжаться аккумулятор. Это связано с тем, что при быстром разряде большими токами (от 1500 А и выше) емкость аккумулятора обычно составляет чуть более половины от номинальной емкости, так как электролит не успевает перемешиваться, и разряженный слой скапливается вокруг пластин, в результате чего падает напряжение на АКБ, а ток разряда и время разряда аккумулятора становятся не пропорциональными друг другу. Однако, спустя несколько десятков минут электролит перемешивается, а емкость и, соответственно, напряжение аккумулятора повышаются.

На рис. 3 представлена имитационная модель АББМ, которая работает через стабилизатор напряжения, инвертор и трансформатор, выдавая запасенную энергию на шины промышленного потребителя 6(10) кВ. Такая модель позволяет показать работу системы в целом.

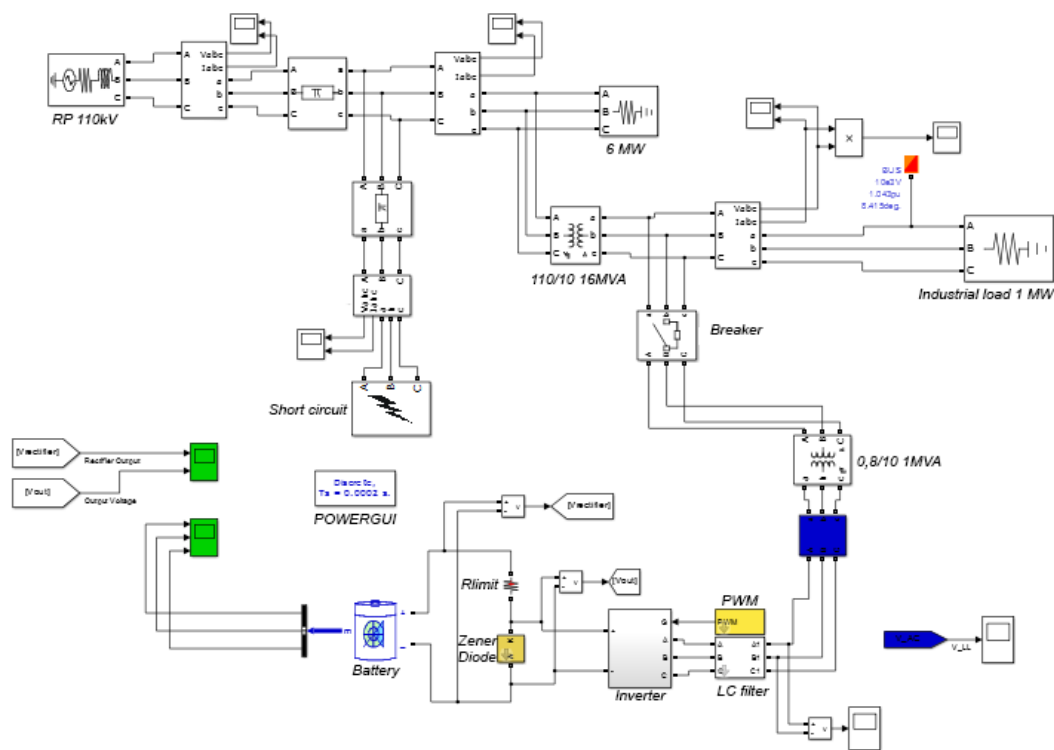


Рис. 3. Имитационная модель подключения АББМ к шинам промышленного потребителя 6(10) кВ

На рис. 4 представлены результаты эксперимента, которые иллюстрируют время срабатывания резервной защиты, основанной на АББМ. В случае возникновения ПН происходит переключение нагрузки при помощи быстродействующего АВР (БАВР), время полного цикла срабатывания составляет 50-60 мс. Время отклика батареи задается в имитационной модели, показанной на рис. 3, и по данным *Electric Power Research Institute* (Научно-исследовательский институт электроэнергетики, США) оно составляет 40-60 мс [10].

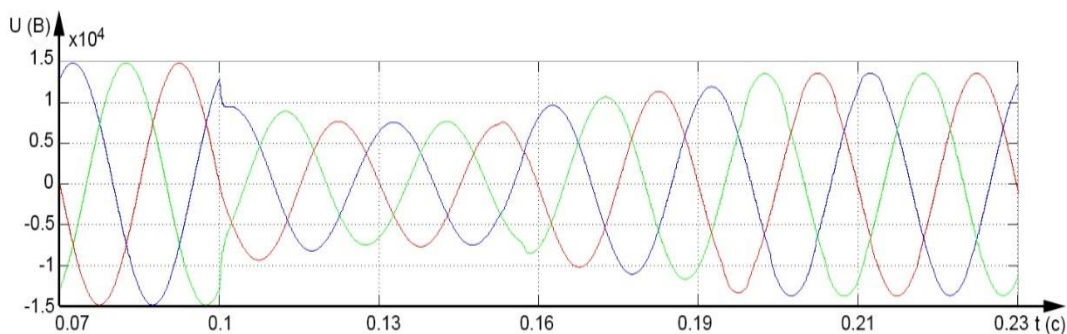


Рис. 4. Время срабатывания резервной защиты, основанной на АББМ

Как видно из осциллограммы (рис. 4), в момент времени 0,1 с происходит ПН, в течение 50 мс срабатывает БАВР, подключается резервная защита, но из-за длительного времени отклика АКБ, который составляет 50 мс, КНЭ с меньшей продолжительностью времени успевают оказать негативное влияние на энергосистему предприятия. Однако это не единственный недостаток АКБ. В частности, к ним можно отнести: недостаточный ресурс работы (небольшое количество циклов заряд-разряд); существенное уменьшение ресурса при работе в пиковых режимах при разряде и заряде; наличие специальных требований к глубине разряда.

Этих недостатков лишены СК – конденсаторные батареи, выполненные на базе ячеек с двойным электрическим слоем, которые все чаще находят применение в качестве накопителей энергии в энергосистеме [11, 12].

Время отклика СК, в отличие от АКБ, значительно меньше и составляет около 1 мкс. Существенными преимуществами емкостных накопителей энергии, расширяющими их применение в импульсных технологиях, являются: простота коммутации при заряде и разряде батареи конденсаторов; возможность строгого дозирования накопленной энергии за счет регулирования уровня напряжения заряда или длительности импульса воздействия, а также способность выдерживать более 500 тыс. циклов заряда/разряда при 100%-ой глубине разряда [13].

Разработана имитационная модель батареи СК (БСК), которая работает через стабилизатор напряжения на нагрузку 1 МВт (рис. 5).

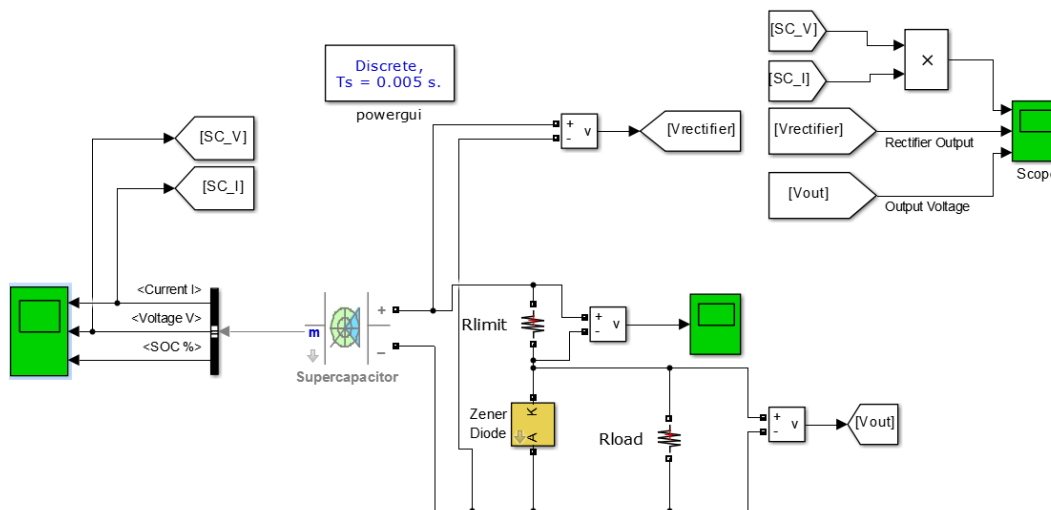


Рис. 5. Имитационная модель БСК и стабилизатора напряжения

Данная модель описывает работу БСК, емкостью 60 Ф и суммарным напряжением 900 В, работающего через стабилизатор, который ограничивает напряжение до 800 В и работает на нагрузку 1 МВт.

На рис. 6 показано время разряда БСК.

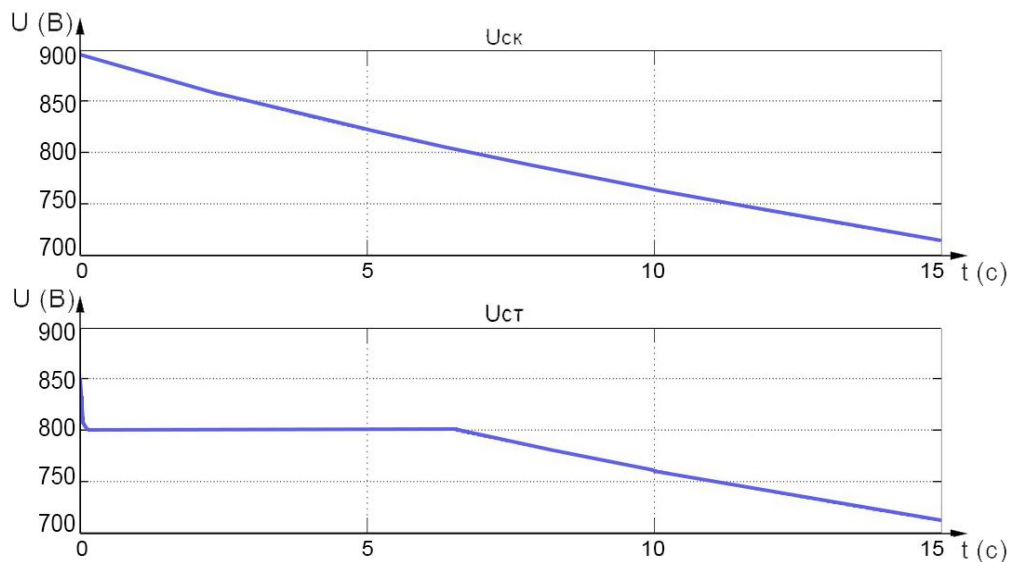


Рис. 6: а – Падение напряжения на БСК
б – Напряжение на выходе после стабилизатора

Как видно из рис. 6, в случае пропадания электрического тока или при выходе его параметров за допустимые нормы БСК позволяет подключенному к ней промышленному потребителю еще в течение непродолжительного времени продолжить работу. БСК стремительно разряжается (рис. 6, а), в то время как напряжение на выходе после стабилизатора остается постоянным (рис. 6, б) и, как следствие, напряжение на шинах промышленного потребителя также остается стабильным. Необходимо учитывать, что отдача электроэнергии нагрузке от накопителя производится при условии соблюдения параметров качества электроэнергии, а это требует решения вопроса электромагнитной совместимости объектов с учетом их экономической эффективности. Кроме того, необходимо решить вопрос минимизации остаточной неиспользованной энергии накопителя.

До определённого уровня напряжение на выходе после стабилизатора может поддерживаться постоянным. Этого времени хватит для ограничения ПН длительностью от 0,02–10 сек. У СК, в отличие от АКБ, есть свой недостаток: низкая энергетическая плотность. Для того, чтобы ограничить КНЭ различной длительности и избежать вышеперечисленных недостатков АББМ и СК, предложен подход, основанный на использовании гибридного накопителя электроэнергии (ГНЭ). ГНЭ представляет собой сложную электротехническую систему, показанную на рис. 7.

Основными элементами имитационной модели ГНЭ являются:

- накопители электроэнергии в виде АББМ и БСК;
- система преобразования тока из одного рода в другой, состоящая из инвертора, стабилизатора напряжения и фильтров;
- система управления данным преобразователем;
- система управления электротехнической системой в целом.

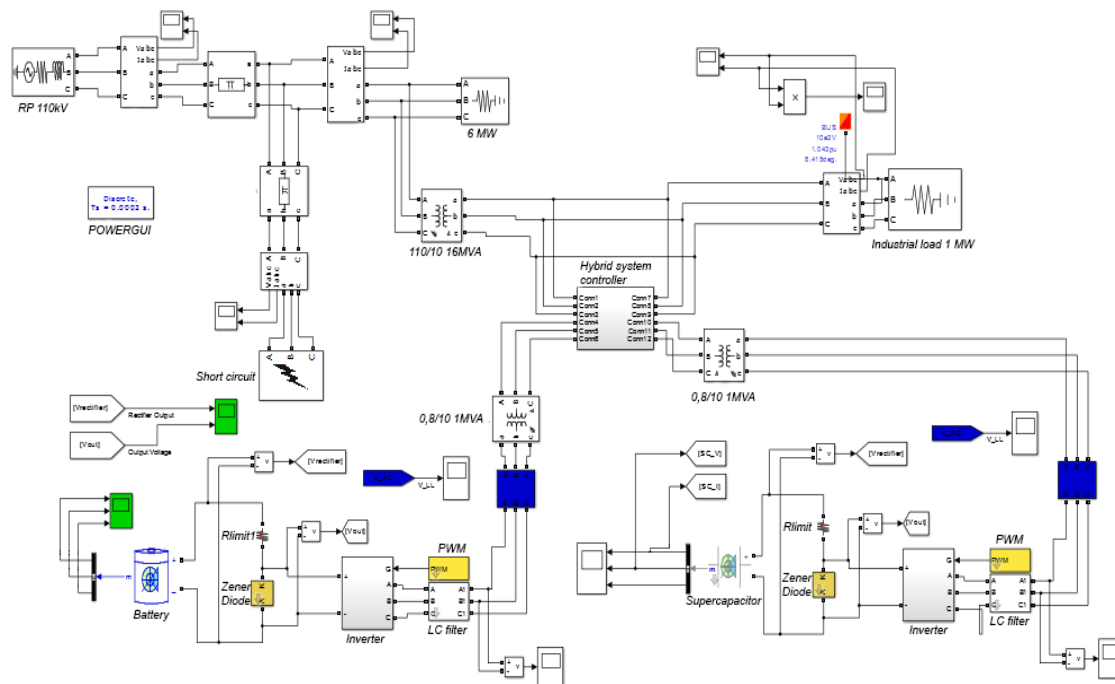


Рис. 7. Имитационная модель ГНЭ

Результаты имитационного моделирования показаны на рис. 8.

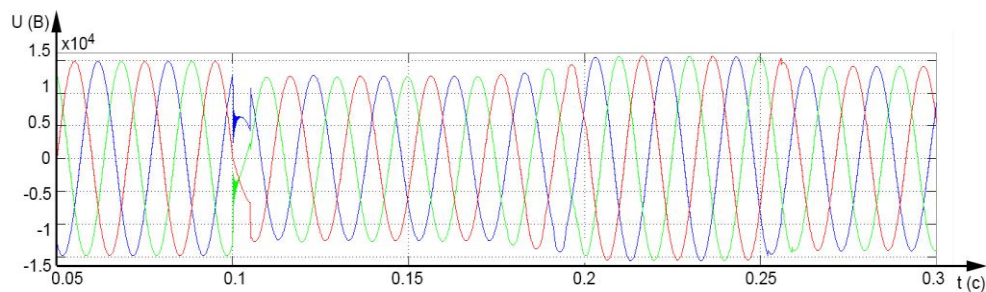


Рис. 8. Результаты имитационного моделирования

Результаты моделирования, представленные на рис. 8, показали, что уровень остаточного напряжения при КНЭ составил 40%. Через 10 мс была включена БСК, что обеспечило практически мгновенное восстановление напряжения до уровня остаточного напряжения 93%. Через 100 мс после ПН подключается АББМ. Непродолжительное время они работают параллельно, затем БСК отключается, и работа продолжается на АББМ.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

1. Рациональный выбор накопителей энергии для ограничения КНЭ позволяет оптимизировать их технические, массогабаритные и стоимостные характеристики.
2. АББМ и БСК можно использовать для ограничения глубины ПН, оказывающего влияние на промышленные предприятия с суммарной потребляемой мощностью 1 МВт и более.
3. БСК целесообразно использовать для ограничения кратковременных ПН, когда чувствительность технологии находится в пределах 1 мс. Для более длительного ПН (от 60 мс и больше) потребуются довольно громоздкие и дорогие установки, состоящие из БСК,

поэтому для ограничения ПН длительностью свыше 60 мс целесообразно применение АББМ.

4. Совместное использование АББМ и БСК в качестве ГНЭ может нивелировать недостатки обоих элементов. Кроме того, появляется возможность в несколько раз увеличить кратковременную мощность накопителя в аварийных режимах работы сети, а также покрывать кратковременные пиковые нагрузки без уменьшения общего ресурса работы накопителя.

Литература

1. Бердников Р.Н., Фортон В.Е., СОН Э.Е., Дельщиков К.К., Жук А.З., Новиков Н.Л., Шакарян Ю.Г. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия единой сети. 2013. №2(7). С. 41–51.
2. Бахтеев К.Р. Использование накопителей электроэнергии для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения // «Молодежь и XXI век 2017: Мат. VII Международной молодежной научной конференции, г. Курск. 2017. - в 4-х томах № 4. С. 216–219.
3. Федотов А.И., Бахтеев К.Р. Влияние форсировки возбуждения синхронных машин на уровень остаточного напряжения при кратковременных нарушениях электроснабжения // Известия Вузов. «Проблемы энергетики». 2016 № 7-8. – С. 64–71.
4. Ch. Ambedker, G. Sathish Goud, S. Rajesh An Integrated Dynamic Voltage Restorer-Ultra Capacitor Design for Improving Power Quality of the Distribution Grid // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015. DOI: 10.1109/TSTE.2015.2402221. Pages. 616–624.
5. Глускин И.З., Ефремов Д.Г., Ефремова И.Ю. Применение накопителей в энергосистеме для целей противоаварийной автоматики // Евразийский Научный Журнал. 2015. № 11. С. 1–7.
6. A. Malhotra, B. Battke, M. Beuse, A. Stephan, T. Schmidt Use cases for stationary battery technologies: A review of the literature and existing projects // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. №56 DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.085. Pages. 705–721.
7. Федотов А.И., Бахтеев К.Р. Повышение качества электроснабжения промышленных потребителей путем использования накопителей электроэнергии при провалах напряжения // В сборнике: Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. г. Чебоксары. 2017. С. 308–311.
8. Дьяконов В.П. MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров. М.: ДМК Пресс, 2010.
9. Fedotov A., Fedotov E., Bahteev K. Application of local Fourier transform to mathematical simulation of synchronous machines with valve excitation systems // Latvian journal of physics and technical sciences. 2017. DOI: 10.1515/lpts-2017-0004. -№ 1. Pages. 31–40.
10. D. Rastler, Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits. EPRI, Palo Alto, CA, 2010. 1020676.
11. Kenan M., Ayşen D., Arsoyb B., Transient modeling and analysis of a DFIG based wind farm with supercapacitor energy storage // International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 78, June 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.020>, Pages 414–421.
12. Коротынский А.Е., Драченко Н.П., Шапка В.А. Особенности применения суперконденсаторов в устройствах для импульсных технологий сварки // Автоматическая сварка. – 2014. №9. С. 36–40.
13. Y. Yoo, M.-S. Kim, J.-K. Kim, Y. Kimb, W. Kim Fast-response supercapacitors with graphitic ordered mesoporous carbons and carbon nanotubes for AC line filtering // Journal of Materials Chemistry A. - 2016. – Issue 14, DOI:10.1039/C6TA00921B.

Автор публикации

Бахтеев Камилль Равилевич – аспирант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: kam1609@mail.ru

References

1. Berdnikov R, Fortov V, SON E, Delshchikov K, Zhuk A, Novikov N, Shakaryan Yu.. Hybrid power storage for UNEG based on accumulators and supercapacitors // Energy of a unified network. 2013. № 2 (7). P. 41–51.
2. Bakhteev K. The use of power storage to prevent short-term power interruption // "Youth and the XXI century - 2017: Mat. VII International Youth Scientific Conference, Kursk. 2017. № 4, in 4 volumes. P. 216–219.
3. Fedotov A, Bakhteev K. Influence of forced excitation of synchronous machines on the level of residual voltage for short-term power failures // News of universities. "Energy Problems" in the publishing of Kazan State Power Engineering University, 2016, № 7-8. P. 64–71.
4. Ch. Ambedker, G. Sathish Goud, S. Rajesh An Integrated Dynamic Voltage Restorer-Ultra Capacitor Design for Improving Power Quality of the Distribution Grid // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015. DOI: 10.1109/TSTE.2015.2402221. C. 616–624.
5. Gluskin I, Efremov D, Efremova I. Application of storage devices in the power system for the purpose of emergency control automation // The Eurasian Scientific Journal. 2015. № 11. P. 1–7.
6. A. Malhotra, B. Battke, M. Beuse, A. Stephan, T. Schmidt Use cases for stationary battery technologies: A review of the literature and existing projects // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. №56, DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.085. Pages. 705–721.
7. Fedotov A, Bakhteev K. Improving the quality of power supply to industrial consumers by using power storage devices in case of voltage failures // In the collection: Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems. Materials of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference. 2017. P. 308–311.
8. Dyakonov V. MATLAB R2007 / 2008/2009 for radio engineers. Moscow: DMK Press, 2010.
9. Fedotov A., Fedotov E., Bahteev K. Application of local Fourier transform to mathematical simulation of synchronous machines with valve excitation systems // Latvian journal of physics and technical sciences 2017. DOI: 10.1515/lpts-2017-0004. -№ 1. – P. 31–40.
10. D. Rastler, Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits. EPRI, Palo Alto, CA, 2010. 1020676.
11. Kenan M., Ayşen D., Arsoyb B., Transient modeling and analysis of a DFIG based wind farm with supercapacitor energy storage // International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 78, June 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.020>, Pages 414–421.
12. Korotynsky A, Drachenko N, Shapka V Features of the application of supercapacitors in devices for pulse welding technologies. // Automatic welding. 2014. №9. P. 36–40.
13. Y. Yoo, M.-S. Kim, J.-K. Kim, Y. Kimb, W. Kim Fast-response supercapacitors with graphitic ordered mesoporous carbons and carbon nanotubes for AC line filtering // Journal of Materials Chemistry A. 2016. Issue 14, DOI:10.1039/C6TA00921B.

Authors of the publication

Kamil Bakhteev - graduate student of the department "Electric power systems and networks", Kazan State Power Engineering University. E-mail: kam1609@mail.ru

Поступила в редакцию

21 декабря 2017 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.436

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ

Ю.М. Бродов, Б.П. Жилкин, Н.С. Кочев, Л.В. Плотников

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

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

Резюме: В статье представлены результаты экспериментального исследования распыла перегретой воды через каналы (отверстия в форсунке), характерные для поршневых двигателей внутреннего сгорания, при разных начальных условиях. В работе кратко рассмотрены преимущества и недостатки современных топливоподающих систем дизельных двигателей. Сформулирован и кратко описан процесс взрывного вскипания применительно к топливной системе дизеля. Представлены результаты распыла перегретой воды через цилиндрический канал и через форсунку действующего дизеля размерности 21/21. Предложена схема реализации топливоподачи в дизельном двигателе с использованием эффекта взрывного вскипания. Предварительные оценки показали, что применение такой топливной системы приведет к повышению надежности элементов, образующих камеру сгорания двигателя, снижению удельного расхода топлива до 2% и уменьшению количества вредных веществ в отработавших газах в среднем на 12%.

Ключевые слова: взрывное вскипание, топливная система, процесс смесеобразования, поршневой двигатель внутреннего сгорания, надежность и экологичность двигателей.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-45-53

INCREASING THE RELIABILITY OF PISTON ENGINES BY THE IMPROVEMENT OF THE MIXING PROCESS

Y.M. Brodov, B.P. Zhilkin, N.S. Kochev, L.V. Plotnikov

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

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

Abstract: The article presents the results of an experimental study of the spraying of superheated water through channels (holes in the nozzle), characteristic of piston internal combustion engines, under different initial conditions. The paper briefly discusses the

advantages and disadvantages of modern fuel systems of diesel engines. The process of explosive boiling is briefly described with reference to the diesel fuel system. The results of spraying superheated water through a cylindrical channel and through a nozzle of an operating diesel of dimension 21/21 are presented. The scheme for the implementation of the diesel fuel system with the use of the explosive boiling effect is proposed. Preliminary estimates have shown that the use of such a fuel system will lead to an increase in the reliability of the elements forming the combustion chamber of the engine, reducing the specific fuel consumption to 2 % and reducing the amount of harmful substances in the exhaust gases by an average of 12 %.

Keywords: *explosive boiling, fuel system, mixture formation process, piston internal combustion engine, reliability and environmental friendliness of engines.*

Введение

На сегодняшний день поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС) широко используются во всех отраслях народного хозяйства Российской Федерации, в том числе в малой энергетике (мобильные и стационарные электростанции на базе ПДВС) и большой энергетике (силовые установки для обеспечения аварийного электроснабжения на тепловых электрических станциях). Поэтому повышение надежности основных агрегатов и систем поршневых ДВС является одной из актуальных задач в области двигателестроения. При этом известно, что около 50% отказов в автомобильных бензиновых двигателях и до 90% отказов дизельных двигателей приходится на топливную систему [1–3]. Таким образом, повышению надежности топливной системы поршневого ДВС следует уделять повышенное внимание.

Одновременно с этим, современные тенденции ужесточения экологических норм для выхлопных газов заставляют производителей поршневых двигателей искать пути снижения эмиссии вредных веществ. В первую очередь данная проблема решается за счет модернизации топливных систем, что делает их более сложными и нагруженными. В частности, увеличение объемной скорости и давления впрыскивания топлива позволяет производить более тонкий распыл топлива в камере сгорания, что приводит к его более полному сгоранию, но требует высокого качества изготовления деталей топливных систем; это, соответственно, увеличивает их стоимость. Также повышаются потери мощности двигателя на привод топливного насоса высокого давления (ТНВД) и снижается надежность системы в целом.

Так, например, применение аккумуляторных топливных систем с электронным управлением типа *Common Rail* отчасти решает экологические и топливо-экономические задачи, но требует использования сложных блоков управления дизельным двигателем, а также применения множества датчиков и электромагнитных клапанов [4–7]. Традиционные системы топливоподачи в виде блочного топливного насоса высокого давления и гидравлически управляемых форсунок либо насос-форсунок имеют сравнительно простую конструкцию по сравнению с *Common Rail*, что дает им преимущество в части относительной стоимости и надежности. Недостатком является ограниченность по максимальному давлению впрыска и, следовательно, ограниченность по топливной экономичности и экологичности [6]. При этом следует подчеркнуть, что любая топливная система с механическим насосом высокого давления и форсунками имеет узлы и элементы, которые наиболее часто становятся причиной выхода из строя дизеля. Такими элементами являются наименее надежные и наиболее изнашиваемые – прецизионные элементы: распылители, нагнетательные клапаны и плунжерные пары [8–10]. Нередко выходят из строя кулачковый вал и ролики толкателей.

В данной статье представлены результаты разработки оригинальной топливной системы на основе эффекта взрывного вскипания. Данная система позволяет производить

тонкий распыл топлива и в то же время является более надежной, поскольку в ней отсутствует механический ТНВД.

Описание экспериментальной установки

Явление взрывного вскипания основано на процессе резкого фазового перехода жидкость – пар. В качестве рабочей среды может выступать любая жидкость, в зависимости от задач, которые предполагается решить [11; 12].

В данном случае необходимо эффективно распылить топливо в камере сгорания дизельного двигателя, т.е. получить максимально однородную смесь воздуха и топлива. Для этого до подачи топлива в форсунку осуществляется его подогрев до температуры, близкой к термодинамически критической. Подогрев топлива происходит в условиях постоянного объема до температуры выше критической для самой тяжелой фракции, содержащейся в топливе, но ниже температуры разложения самой легкой фракции; одновременно повышается давление выше критического. Такой подогрев приводит к тому, что при попадании топлива в камеру сгорания происходит вскипание, которое вызывает его эффективное распыление и создает равномерное распределение капель топлива по всему объему камеры сгорания.

На рис. 1 показана конструктивная схема рабочей камеры экспериментальной установки, которая обеспечивает стационарное истечение жидкости в течение нескольких десятков секунд. Начальные состояния жидкости в рабочей камере изменялись вдоль линии насыщения или вдоль изобар и охватывали широкий диапазон параметров, включая условия взрывного вскипания. Более подробное описание экспериментальной установки и методики проведения опытов представлено в работе [13]. В данном исследовании рабочей жидкостью являлась вода.

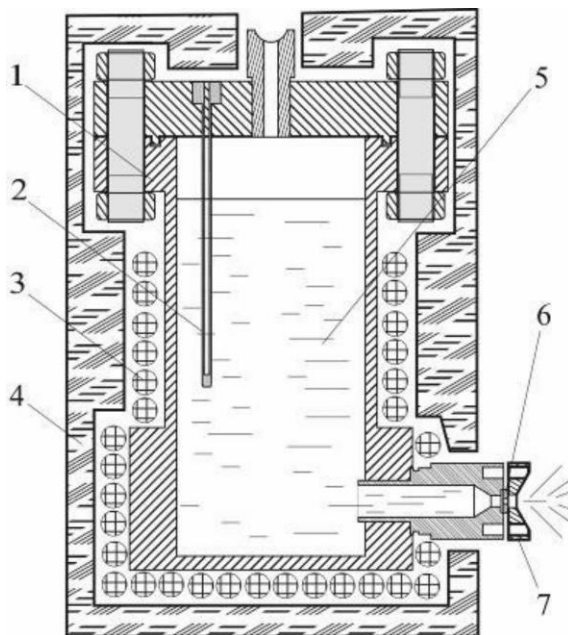


Рис. 1. Схема рабочей камеры экспериментальной установки: 1 – корпус камеры; 2 – кожух для термопары; 3 – нагревательный элемент; 4 – теплоизолятор; 5 – жидкость; 6 – канал; 7 – прижимной фланец

На рис. 2 показан распыливающий насадок с цилиндрическим каналом и его основные размеры.

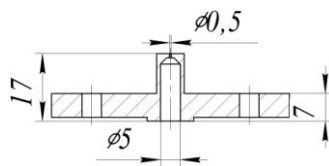


Рис. 2. Распыливающий насадок с цилиндрическим каналом

В данном случае длина распыливающего отверстия в насадке равнялась $l \approx 0,7$ мм, диаметр цилиндрического канала составлял $d = 0,5$ мм.

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 3 показаны формы струй воды при истечении с линии насыщения через насадку с цилиндрическим каналом для разных значений температуры в сосуде высокого давления T_{0s} .

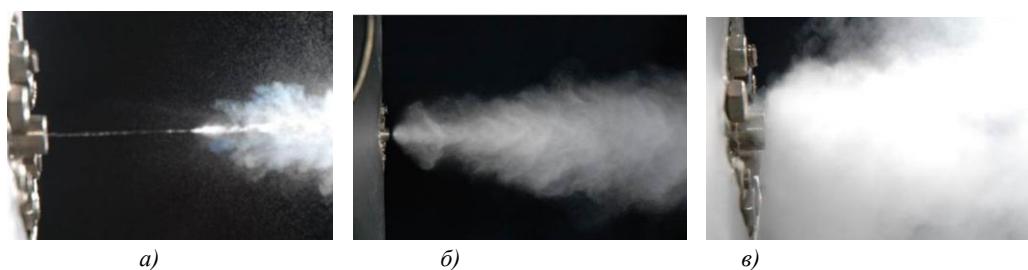


Рис. 3. Виды струй воды при истечении с линии насыщения:

а) $T_{0s} = 170^\circ\text{C}$; б) $T_{0s} = 182^\circ\text{C}$; в) $T_{0s} = 300^\circ\text{C}$

Из рис. 3,а видно, что струя вскипает за выходным срезом канала на некотором расстоянии в направлении движения потока, т.е. наблюдается некоторая задержка вскипания.

С увеличением степени перегрева воды возрастает число активированных центров кипения и область вскипания приближается к выходному срезу канала, и при температуре $T_{0s} = 180^\circ\text{C}$ струя приобретает форму, показанную на рис 3,б. Поток достаточно гомогенный, с гладкими внешними границами вблизи канала. Следует отметить, что при истечении воды в температурном интервале T_{0s} от 220 до 250°C обеспечивается тонкое диспергирование.

При температуре $T_{0s} = 300^\circ\text{C}$ вскипание происходит уже внутри канала, и на выходе наблюдается двухфазный поток с изрезанными границами (см. рис. 3,в).

Таким образом, рост температуры жидкости перед распыливающим отверстием постепенно снижает диаметр капель на выходе и повышает однородность их распределения по потоку, причем данная тенденция прослеживается только в определенном диапазоне температур. Процесс смесеобразования в этом случае улучшается за счет более равномерного перемешивания топлива с воздушной смесью в камере сгорания.

Результаты экспериментов указывают на то, что оперативным управлением степенью перегрева жидкости и геометрическими параметрами распыливающего отверстия насадки (форсунки) можно существенно менять форму струи и, тем самым, создавать такую ее конфигурацию, которая максимально соответствовала бы форме камеры сгорания двигателя и была бы оптимальной для данного режима работы поршневого двигателя. Кроме того, при распылении на основе вскипания можно путем надлежащего подбора степени

перегрева обеспечить необходимую корректировку формы струи распыла. В итоге применительно к поршневым двигателям эти мероприятия должны привести к повышению мощности ДВС, уменьшению удельного расхода топлива, снижению токсичности отработавших газов и повышению надежности конструктивных элементов, образующих камеру сгорания. После получения положительных результатов по распылу перегретой воды из насадки с одним каналом были проведены исследования для реальной форсунки дизельного двигателя.

В экспериментальную установку, описанную выше, была установлена форсунка Ф210-2-04 (0210.24.000.000-2.04) ТУ 24.06.2077-85 производства ОАО «Волгодизельаппарат». Диаметр канала в распылителе форсунки составлял 0,35 мм, количество каналов (распыливающих отверстий) – 8, угол развала – 145°. Начальные параметры в рабочей камере варьировались от температуры воды 21°C и давления в рабочей камере $P_{0s} = 1,2$ МПа (ненасыщенное состояние) до параметров линии насыщения воды при температуре 250°C и давления $P_{0s} = 4,0$ МПа. Результаты экспериментов, представленные на рис. 4, показали, что при распыле жидкости при параметрах линии насыщения вскипание происходит на активированных гетерогенных центрах вблизи выходного среза канала и приводит к постепенному расширению струи в направлении движения потока.

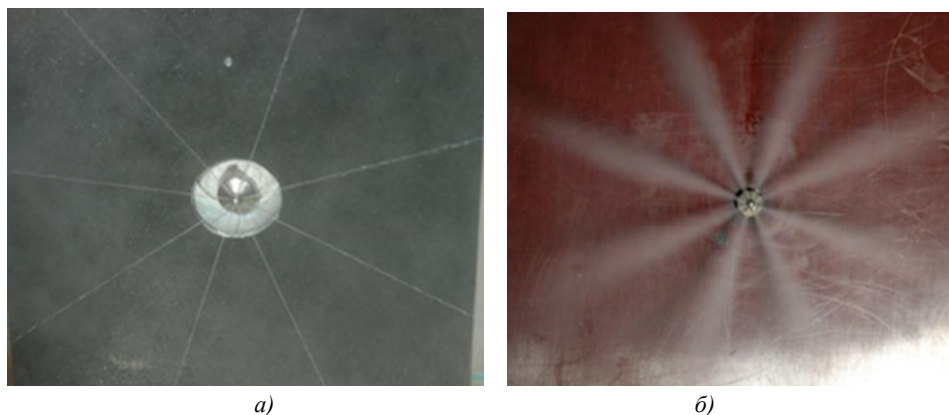


Рис. 4. Формы струй воды, истекающей через форсунку дизельного двигателя при различных начальных параметрах: а) начальная температура 21°C и давление 1,2 МПа; б) начальная температура $T_c = 250^\circ\text{C}$ и давление 4,0 МПа

Следует отметить, что в зависимости от степени перегрева происходили изменения формы струи распыливаемой жидкости аналогично с результатами истечения жидкости через один канал. В частности, перегрев жидкости способствовал снижению диаметра капель воды на выходе и повышал однородность их распределения по потоку; при этом угол раскрытия факела струй увеличивался.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности более эффективного распыливания топлива, о его почти мгновенном переходе в газовую фазу за счет эффекта взрывного вскипания. Это должно привести к ряду положительных эффектов:

- повышению мощности и надежности дизельного двигателя за счет отсутствия или снижения давления, развиваемого топливным насосом высокого давления в системе топливоподачи, в связи с чем должны уменьшиться затраты мощности двигателя на его привод и увеличиться ресурс двигателя;

- снижению удельного расхода топлива за счет более равномерного перемешивания с воздухом топлива по объему камеры сгорания и, соответственно, более полного его сгорания;

- снижению токсичности отработавших газов дизеля: за счет более равномерного распределения топлива по объему камеры сгорания, что приводит к более полному сгоранию, а также за счет сокращения времени на процесс смесеобразования и сгорания, что уменьшает количество образующихся оксидов азота NO_x и, соответственно, снижает количество вредных веществ в отработавших газах;

- повышению надежности элементов, образующих камеру сгорания дизеля, за счет более равномерного распределения температуры по объему камеры сгорания, а соответственно, и более равномерному распределению температур в деталях, образующих камеру сгорания, что проявляется в снижении температурных напряжений в них, что приводит к повышению их надежности.

Топливная система поршневого ДВС с использованием эффекта взрывного вскипания

Для реализации рассматриваемого способа топливоподачи с использованием эффекта взрывного вскипания была разработана предполагаемая схема работы новой системы топливообеспечения дизеля, которая показана на рис. 5.

Схема работает следующим образом. Топливо из топливного бака 8 проходит через фильтр грубой очистки топлива 13 и далее закачивается топливоподкачивающим насосом в бойлеры для нагрева топлива 10, проходя перед этим через фильтр тонкой очистки топлива 12. Позиции 8, 13, 11 и 12 формируют контур низкого давления топлива.

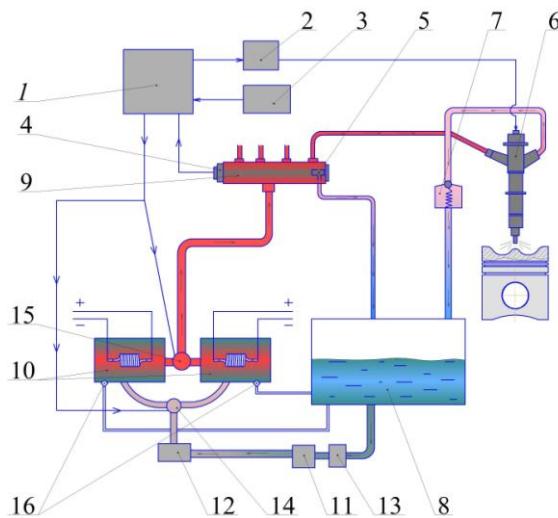


Рис. 5. Схема топливной системы дизеля с использованием эффекта взрывного вскипания:
 1 – блок управления двигателем; 2 – усилитель форсунок; 3 – датчики; 4 – датчик давления топлива в рампе; 5 – ограничитель давления; 6 – пьезоэлектрическая форсунка; 7 – клапан обратный; 8 – бак топливный; 9 – рампа топливная; 10 – бойлер для нагрева топлива; 11 – насос топливоподкачивающий; 12 – фильтр тонкой очистки топлива; 13 – фильтр грубой очистки топлива; 14 – электромагнитный клапан-переключатель топливной магистрали низкого давления; 15 – электромагнитный клапан-переключатель топливной магистрали высокого давления; 16 – клапан сброса остаточного давления

В бойлерах 10 установлены ТЭНы, посредством которых топливо нагревается до необходимой температуры, контролируемой датчиком. Далее происходит перекрытие

электромагнитных клапанов 14 и 15 так, чтобы только один из бойлеров был соединен с топливной рампой 9 и одновременно был изолирован от контура низкого давления топлива.

Топливная рампа 9 аккумулирует перегретое в бойлере 10 топливо и сглаживает пульсации давления. В корпусе рампы вмонтированы датчик давления топлива 4 и ограничитель давления 5, которые служат для поддержания необходимых параметров топлива перед впрыском. Полость топливной рампы соединена трубопроводами высокого давления с пьезоэлектрическими форсунками 6, которые служат для подачи перегретого топлива в цилиндры двигателя. Форсунки управляются блоком управления двигателем 1 посредством электрического сигнала и усилителя форсунок 2.

Данная схема является лишь одним из возможных способов реализации топливоподачи с использованием эффекта взрывного вскипания. Так, например, вместо ТЭНов можно использовать теплоту выхлопных коллекторов двигателя. Возможно полностью отказаться от топливной рампы, использовать всего один бойлер-нагреватель или наоборот, применить отдельные бойлеры на каждом цилиндре.

Заключение

Таким образом, на основании рассмотренных данных можно сделать следующие основные выводы.

1. Представлены результаты исследования процесса взрывного вскипания применительно к топливной системе дизельного двигателя; показаны результаты распыла перегретой воды через цилиндрический канал и через форсунку реального дизеля, а также предложена схема реализации топливоподачи в дизеле с использованием эффекта взрывного вскипания.

2. Реализация предложенных систем топливоснабжения в поршневых двигателях внутреннего сгорания потенциально может привести к следующим положительным явлениям:

- повышению мощности (до 5–10% за счет отсутствия потерь мощности на привод ТНВД);
- повышению надежности элементов, образующих камеру сгорания и двигателя в целом (увеличению показателя безотказности на 3–5% за счет снижения теплонапряженности деталей и количества прецизионных пар трения);
- снижению удельного расхода топлива (до 2% за счет увеличения полноты сгорания топлива);
- снижению количества вредных веществ в отработавших газах на 10–15% (по предварительным оценкам выше уровня современных дизелей с системой *Common Rail* и применением систем фильтрации выхлопных газов).

Все вышеизложенное доказывает возможность решения актуальных задач современного двигателестроения в области экологии, надежности и топливной экономичности при использовании предлагаемого способа топливоподачи и смесеобразования в дизельных двигателях. При этом следует отметить, что рассматриваемая система топливоподачи для поршневых двигателей требует дополнительных расчетных и экспериментальных исследований с другими жидкостями (включая дизельное топливо) и более тщательной инженерной проработки для последующей реализации в промышленности.

Литература

1. Гурвич И.Б., Сыркин П.Э., Чумак В.И. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1994. 144 с.
2. Григорьев М.А., Донецкий В.А. Обеспечение надежности двигателей. М.: Изд-во стандартов, 1978. 322 с.
3. Плотников Л.В. Анализ и оценка надежности двигателей внутреннего сгорания: учебно-методическое пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 160 с.

4. Грехов Л.В., Денисов А.А., Старков Е.Е. Впрыскивание дизельного топлива под давлением до 400 МПа // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 8. С. 24–28.
5. Грехов Л.В. Аккумуляторные топливные системы двигателей внутреннего сгорания типа Common Rail. М.: МГТУ, 2000. 64 с.
6. Грехов Л.В., Габитов И.И., Негвора А.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей. М.: Легион-Автодата, 2013. 292 с.
7. Ferrari A., Pizzo A. Fully predictive Common Rail fuel injection apparatus model and its application to global system dynamics analyses // International journal of engine research. 2017. Vol. 18, № 3. P. 273–290.
8. Русинов Р.В. Топливная аппаратура судовых дизелей. М.: Судостроение, 1971. 224 с.
9. Иванов В.Н. О заклинивании прецизионных деталей насосов высокого давления // Электрическая и тепловозная тяга. 1964. № 12. С. 38–42.
10. Сутин Л.В., Долины В.Н. О влиянии некоторых факторов на надежность работы распылителей // Труды ЦНИДИ. 1966. Вып. 54. С. 13–18.
11. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость: монография. М.: Наука, 1972. 312 с.
12. Буланов Н.В. Взрывное вскипание диспергированных жидкостей. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011. 232 с.
13. Влияние термических и геометрических факторов на распыл жидкости при взрывном вскипании / Н.А. Мажейко, А.В. Решетников, К.А. Бусов, В.П. Коверда, А.А. Старостин, Л.В. Плотников, Б.П. Жилкин, Ю.М. Бродов // Тяжелое машиностроение. 2014. № 6. С. 35–40.

Авторы публикации

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

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

Кочев Николай Сергеевич – аспирант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: kochev91@list.ru.

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

References

1. Gurvich I.B., Syrkin P.E., Chumak V.I. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' avtomobil'nykh dvigatelei. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1994. 144 s.
2. Grigor'ev M.A., Donetskii V.A. Obespechenie nadezhnosti dvigatelei. M.: Izd-vo standartov, 1978. 322 s.
3. Plotnikov L.V. Analiz i otsenka nadezhnosti dvigatelei vnutrennego sgoraniya: uchebno-metodicheskoe posobie. Ekaterinburg: UrFU, 2016. 160 s.
4. Grekhov L.V., Denisov A.A., Starkov E.E. Vпрыскивание дизел'ного topliva pod davleniem do 400 MPa // Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh, 2015. № 8. S. 24–28.
5. Grekhov L.V. Akkumulyatornye toplivnye sistemy dvigatelei vnutrennego sgoraniya tipa Common Rail. M.: MGTU, 2000. 64 s.
6. Grekhov L.V., Gabitov I.I., Negvora A.V. Konstruktsiya, raschet i tekhnicheskii servis

toplivopoddayushchikh sistem dizelei. M.: Legion-Avtodata, 2013. 292 s.

7. Ferrari A. Fully predictive Common Rail fuel injection apparatus model and its application to global system dynamics analyses / A. Ferrari, P. Pizzo // International journal of engine research. 2017. Vol. 18, № 3. Rr. 273–290.

8. Rusinov R.V. Toplivnaya apparatura sudovykh dizelei. M.: Sudostroenie, 1971. 224 s.

9. Ivanov V.N. O zaklinivani pretsizionnykh detalei nasosov vysokogo davleniya // Elektricheskaya i teplovopoddayushchikh sistem dizelei. M.: Legion-Avtodata, 2013. 292 s.

10. Sutin L.V., Dolini V.N. O vliyani nekotorykh faktorov na nadezhnost' raboty raspylitelei // Trudy TsNIDI, 1966, vyp. 54. S. 13–18.

11. Skripov V.P. Metastabil'naya zhidkost': monografiya. M.: Nauka, 1972. 312 s.

12. Bulanov N.V. Vzryvnoe vskipanie dispergirovannykh zhidkoste. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2011. 232 s.

13. Vliyanie termicheskikh i geometricheskikh faktorov na raspyl zhidkosti pri vzryvnom vskipanii / N.A. Mazheiko, A.V. Reshetnikov, K.A. Busov, V.P. Koverda, A.A. Starostin, L.V. Plotnikov, B.P. Zhilkin, Yu.M. Brodov // Tyazheloe mashinostroenie, 2014, № 6. S. 35–40.

Authors of the publication

Boris P. Zhilkin – Dr. of Phys.-math. Sciences, Professor of the “Heat power and heat engineering” Department Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Yurii M. Brodov – Dr. of technical Sciences, head of the Department of turbines and engines Ural Federal University the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Nikolaj S. Kочев – postgraduate student of the Heat power and heat engineering Department Ural Federal University the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Leonid V. Plotnikov – candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of turbines and engines Ural Federal University the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Поступила в редакцию

08 ноября 2017 года.

**НОВАЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА
ЭЛЕКТРОДЕЭМУЛЬСАЦИИ НЕФТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ**

В.Н. Швецов, А.А. Юнусов

ЗАО «Нефтех», г.Казань, Россия
mail@neftech.ru

Резюме: Выявлены принципиальные технические и технологические недостатки существующих электродегидраторов и электрокоалесцеров. Установлено, что их причинами являются чрезвычайно низкое удельное электрическое сопротивление и эквипотенциальность поверхности металлических электродов. Предложены концептуально новые технические решения, основанные на использовании в качестве материала электродов электропроводящих полимерных композитов с заданными электрофизическими и физико-химическими свойствами. Эффективность предложенных решений подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: электродегидратор, электрокоалесцирующий аппарат, удельное электрическое сопротивление, электропроводящие полимерные композиты (ЭПК), резистивность, напряженность электрического поля.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-54-61

**INNOVATIVE ENERGI-EFFICIENT TECHNOLOGY AND TECHNIQUE FOR
OIL ELECTRICAL DEEMULSIFICATION ON BASIS OF COMPOSITE
ELECTRODES USAGE**

V.N. Shvetsov, A.A. Yunusov

CJSC “Neftech”, Kazan, Russia
mail@neftech.ru

Abstract: Essential technological and technical weaknesses were found among existing electrostatic dehydrators and electro-coalescing units. It was determined that the cause is critically low electrical resistivity and surface equipotentiality of metallic electrodes. Conceptually new technical solutions are suggested, that are based on the usage of electrically-conductive polymer composites as electrode material with imposed electro-physical and physico-chemical properties. The effectiveness of suggested solutions were confirmed by testing.

Keywords: electrodehydrator, electrocoalecing apparatus, electrical resistivity, electrically conductive polymeric composites, resistivity, electric-field strength.

Электрические поля высокой напряженности являются наиболее мощным и эффективным средством обеспечения глубокого обезвоживания и обессоливания нефти перед поступлением ее на переработку. Основным преимуществом электрического метода является инициированная полем принудительная коалесценция и укрупнение капель эмульгированной в нефти воды, в результате которой кратно возрастает скорость ее

отделения, существенно увеличивается глубина обезвоживания и обессоливания нефти, а также улучшается управляемость процесса деэмульсации.

Однако несмотря на то, что первый аппарат для электродеэмульсации нефти был запатентован еще в 1911 году [1] и за прошедшее столетие было предложено множество вариантов конструктивного решения электродегидраторов, принципиальных изменений эти аппараты не претерпели, а технологические преимущества и потенциальные возможности электрического поля и в современных электродегидраторах в полной мере до сих пор не реализованы. Причина заключается в том, что этим аппаратам присущ ряд недостатков, по крайней мере два из которых носят принципиальный, концептуальный характер.

Первый из них – межэлектродные пробой обрабатываемой водонефтяной эмульсии, возникающие спонтанно, протекающие неуправляемо и лавинообразно вплоть до короткого замыкания электродов с аварийным отключением высоковольтного источника питания (ВИП) и нарушением технологического режима электродеэмульсации. Механизм этого явления известен давно и обусловлен действием диэлектрофоретических сил, втягивающих поляризованные капли воды в области локальных неоднородностей электрического поля с повышенной напряженностью и выстраивающих короткозамыкающие цепочки – мостики из проводящих капель. Межэлектродные пробой эмульсии влекут за собой еще одно крайне негативное последствие, а именно: они сопровождаются интенсивным передиспергированием капель эмульгированной воды до мельчайших размеров, препятствующих их дальнейшему отделению от нефтяной фазы [2]. Вероятность коротких замыканий резко возрастает с ростом содержания воды в нефти, поэтому эти аппараты крайне критичны к обводненности сырья, поступающего в их электродную зону.

Все попытки устранить этот недостаток, например, использованием высокочастотных, импульсных, вращающихся электрических полей, изоляцией одного из электродов слоем как обычного диэлектрика, так и сегнетоэлектрического покрытия, созданием резко неоднородных электрических полей и др. оказались неэффективными и не нашли практического применения. В итоге в этом плане все свелось к использованию в ВИП реактивных катушек в их первичной цепи. Эти катушки не устраняют указанный недостаток, а выполняют лишь сугубо утилитарную функцию защиты ВИП от выхода из строя, то есть фактически играют роль предохранителя.

Вторым принципиальным технологическим недостатком является неоптимальная конфигурация электрического поля и обусловленный этим неэффективный режим электрообработки водонефтяной эмульсии с неизменной по высоте электродной зоны напряженностью, не согласованный с динамикой одновременно и взаимосвязанно протекающих процессов коалесценции капель воды и их гравитационной седиментации. В случае использования вертикальных металлических электродов это является прямым следствием эквипотенциальности их поверхности.

Описанные выше недостатки в равной мере относятся и к компактным устройствам другого типа для электродеэмульсации нефти – электрокоалесцирующим аппаратам (электрокоалесцерам), в отличие от объемных электродегидраторов выполняющим более частную функцию укрупнения капель дисперсной фазы водонефтяной эмульсии для последующего гравитационного разделения фаз в отстойной аппаратуре.

В результате детального анализа авторы пришли к выводу, что причина этих недостатков заключается в свойствах материала используемых электродов. Одним из них является весьма низкое удельное электрическое сопротивление (УЭС) металла (в данном случае – стали), обуславливающее, в частности, и эквипотенциальность поверхности электродов. Так, если УЭС нефтей находится в диапазоне от $\sim 10^6$ до $\sim 10^8$ Ом·м, то УЭС стали составляет всего около 10^{-7} Ом·м, что ниже на $13 \div 15$ порядков!

Другим свойством является склонность металлических электродов к искро- и дугообразованию, способствующая возникновению и поддержанию в объеме

обрабатываемой эмульсии межэлектродных пробоев, перерастающих в короткие замыкания электродов.

Сформулированный вывод привел авторов к нетривиальному, концептуальному решению, суть которого заключается в отказе от высокопроводящих металлических электродов и замене их электродами из нового альтернативного материала с заданными электрофизическими и физико-химическими свойствами. В качестве такового был выбран материал из разряда низконаполненных электропроводящих полимерных композитов (ЭПК). Эти композиты, в зависимости от природы полимерной матрицы, электрофизических и физико-химических свойств наполнителя, его гранулометрического состава, формы частиц, степени наполнения и технологических параметров процесса изготовления конкретных структур и изделий, обладают широчайшим диапазоном задаваемых и реализуемых характеристик и уникальными свойствами в электрических, магнитных и других полях. В частности, уровень электропроводности может задаваться в диапазоне до 20 порядков. Поэтому композиты и создаваемые из них структуры называют «умными» (*smart*) или «очень умными» (*very smart*) [3; 4]. По характеру распределения частиц наполнителя в полимерной матрице эти композиты разделяются на матричные, структурированные и статистические [5; 6]. Учитывая то, что наиболее подробно изучены ЭПК со статистическим распределением наполнителя [7], а также их технологичность, в производстве окончательный выбор был сделан в пользу последних.

Из задаваемых электрофизических свойств ключевым являлась резистивность: удельное электрическое сопротивление композита должно существенно, более чем на 10 порядков превышать УЭС стали и быть сопоставимым с нижним пределом УЭС нефти. Из физико-химических свойств новых электродов, которые практически полностью определяются выбором полимерной матрицы композита, важнейшими являются: гидрофобность поверхности, хорошие антиадгезионные свойства, высокая стойкость к воздействию агрессивных сред и широкий диапазон рабочих температур.

В результате экспериментов с различными полимерными материалами, природой проводящего наполнителя, его гранулометрическим составом, содержанием его в объеме матрицы и технологией изготовления были получены резистивные композитные электроды с комплексом заданных электрофизических и физико-химических свойств.

Эквивалентная схема зоны электрообработки одной из многочисленных пар электродов электродегидрататора или электродов электрокоалесцера (их всего два) показана на рис. 1. Здесь 1 – высокопотенциальный композитный электрод; 2 – заземленный металлический электрод; $R_1, R_2, R_3, \dots R_n$ – активные сопротивления элементарных объемов водонефтяной эмульсии; $C_1, C_2, C_3, \dots C_n$ – их емкости, представляющие собой реактивные сопротивления; $R'_1, R'_2, R'_3, \dots R'_n$ – сопротивления соответствующих малых участков композитного электрода ($n \rightarrow \infty$). Величина УЭС композитных электродов рассчитывается исходя из электропроводности конкретной нефти, ее обводненности и минерализации водной фазы. Эти три параметра определяют полное сопротивление (импеданс) обрабатываемой эмульсии $Z_i = \frac{R_i R_{ci}}{R_i + R_{ci}}$, где R_i – активное сопротивление i -го элементарного объема эмульсии, R_{ci} – его реактивное (емкостное) сопротивление.

На первом этапе были проведены экспериментальные исследования, целью которых было установление наличия и характера распределения потенциала по высоте композитного электрода в реальных условиях электродеэмульсации нефти в стендовом электродегидрататоре. С использованием зондового метода [8; 9] было установлено, что такое распределение существует и носит явно выраженный нелинейный характер. При этом скорость роста потенциала (а следовательно, и напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве) постепенно увеличивается в направлении от нижней кромки композитного электрода к верхней. Таким образом экспериментально подтверждено, что поверхность композитного электрода, в отличие от металлического, действительно не является

эквипотенциальной, что является совокупным следствием резистивности композита и гидрофобности его поверхности, препятствующей образованию на ней проводящей водной пленки. Нелинейный же характер распределения указывает на соблюдение специфического, несвойственного металлам соотношения $R'_1 < R'_2 < R'_3 < \dots < R'_n$.

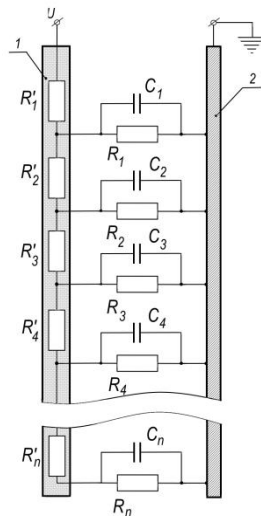


Рис. 1. Эквивалентная схема электродной зоны

На следующем этапе была проведена обширная серия экспериментов по исследованию процесса электродеэмульсации нефти с использованием стантовых электродегидрататора и электрокоалесцера с композитными электродами. Исследования проводились в широком диапазоне физико-химических свойств нефтей и электрических и технологических параметров процесса:

- удельная электропроводность нефтей – от 10 до 1000 нСм/м;
- обводненность деэмульгируемых нефтей – от 3 до 40%;
- минерализация водной фазы – от 500 мг/дм³ до 364 г/дм³;
- рабочая температура – от 10 до 95°C;
- напряженность электрического поля в верхней части электродной зоны – от 0,5 до 4 кВ/см.

Результаты экспериментов убедительно подтвердили спрогнозированное ранее отсутствие коротких замыканий электродов стантовых электродегидрататора и электрокоалесцера даже при обводненности нефти 40% и выше и напряженностях электрического поля до 4 кВ/см, что в принципе недостижимо для подобных аппаратов с традиционными металлическими электродами. Более того, не было отмечено и локальных кратковременных пробоев эмульсии. Электрический режим деэмульсации во всем исследованном диапазоне параметров процесса характеризовался высокой стабильностью, сила потребляемого аппаратами тока, в зависимости от обводненности нефти, составляла от единиц до десятков микроампер, а ее флуктуации не превышали 2%.

Что касается конфигурации электрического поля и режима электрообработки деэмульгируемой нефти, то преимущества композитных электродов перед металлическими в электродегидрататоре, в котором одновременно осуществляются процессы электрокоалесценции и гравитационного осаждения дисперсной водной фазы нефтяной эмульсии, реализуются двояким образом. Конфигурация поля и режим электрообработки в этом случае таковы, что они оптимальны как для эмульсии, движущейся вверх, так и для укрупнившихся капель воды, осаждающихся в гравитационном поле.

Эмульсия, в которой по мере движения вверх численная концентрация капель воды постепенно снижается, средние расстояния между ними возрастают, а размеры остающихся в потоке капель становятся все меньше, последовательно проходит области все большей напряженности электрического поля, что обеспечивает высокую вероятность коалесценции капель полидисперсной эмульсии по всей высоте электродной зоны.

В то же время уже укрупнившиеся и осаждающиеся капли воды последовательно проходят области электрообработки с постепенно снижающейся напряженностью поля, что предотвращает возможность их повторного диспергирования и способствует их доукрупнению.

В электрокоалесцирующих аппаратах, в которых, в отличие от объемных электродегидраторов, осуществляется только процесс коалесценции капель, а содержание дисперсной водной фазы остается неизменным, применение композитных электродов также позволяет реализовать эффективный режим электрообработки деэмульгируемой нефти: в этом случае напряженность поля постепенно снижается в направлении вертикального нисходящего движения обрабатываемой эмульсии, обеспечивая наиболее благоприятные условия для непрерывного процесса укрупнения капель воды и предупреждения их повторного диспергирования.

Обобщенные результаты экспериментов по обезвоживанию нефтей в стендовом электродегидраторе с композитными электродами, по размерам и характеристикам идентичными электродам, используемым в промышленных аппаратах, приведены в таблице.

Таблица

Результаты обезвоживания нефти в стендовом электродегидраторе с композитными электродами

Плотность нефти при 20°C, кг/м ³	Кинематическая вязкость нефти при 20°C, мм ² /с	Исходное содержание воды в нефти, %	Рабочая температура, °C	Удельный расход деэмульгатора, г/т	Напряженность электрического поля E, кВ/см *	Остаточное содержание воды в контрольной пробе (E=0), %	Остаточное содержание воды в рабочей пробе, %
837,1	14,7	5,5	42	30	2,5	1,68	0,23
837,1	14,7	10,3	38	30	2,0	2,37	0,19
884,7	28,3	20,1	45	35	2,0	7,20	0,38
896,4	38,8	25,2	60	50	1,8	6,80	0,47

Результаты экспериментов по обезвоживанию нефтей по схеме электрокоалесценции – отстойник показаны на рис. 2. Полученные в ходе длительных экспериментальных исследований результаты дают основание заключить, что использование в электродегидраторах и электрокоалесцирующих аппаратах резистивных композитных электродов позволяет стабильно обезвоживать нефти с различными физико-химическими и электрическими свойствами до остаточного содержания воды менее 0,5% в широком диапазоне обводненностей сырья, недоступном для аналогичных аппаратов с традиционными металлическими электродами.

Экспериментальные исследования процесса электрообезвоживания сверхвязкой нефти с плотностью порядка 965 кг/м³, слабоминерализованной высокодисперсной водной фазы и, как следствие, крайне низкой разностью плотностей воды и нефти были проведены с использованием стендового электродегидратора с композитными электродами коаксиального исполнения в институте «ТатНИПИнефть» [10]. На основании полученных результатов в работе сделан вывод о возможности эффективного применения аппаратов с композитными электродами для деэмульсации нефтей даже с такими экстремальными физико-химическими свойствами.

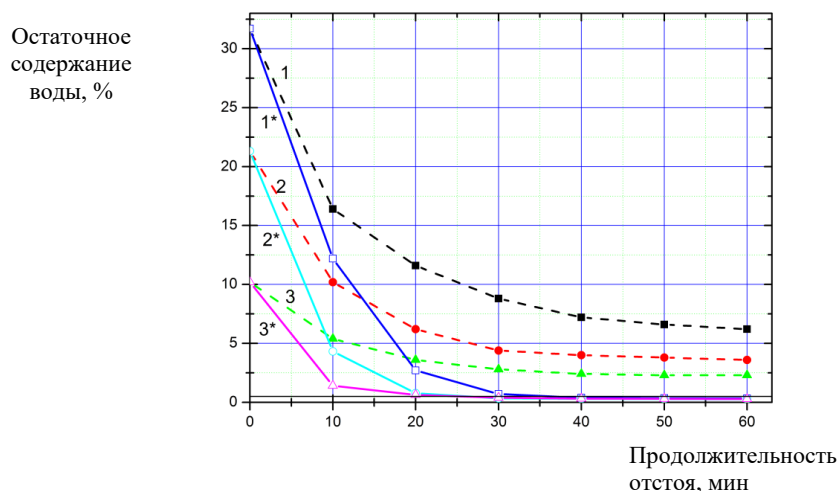


Рис. 2. Динамика обезвоживания нефти по схеме электрокоалесцер – отстойник: исходное содержание воды в нефти, соответственно, 31,7; 21,3; 10,2%;

1, 2, 3 – контрольные пробы (электрическое поле отсутствует);

1*, 2*, 3* – рабочие пробы, напряженность поля, соответственно, 1,2; 1,7; 2,2 кВ/см

На основании изложенных выше теоретических предположений и подтвердивших их результатов экспериментальных исследований были разработаны технические решения, легшие в основу двух типов аппаратов: электродегидраторов [11] и электрокоалесцирующих аппаратов [12] нового поколения, в которых реализуются преимущества использования резистивных композитных электродов.

Электродегидратор с композитными электродами показан в разрезе на рис. 3, общий вид электрокоалесцирующей установки – на рис. 4. В зависимости от количества электрокоалесцеров в составе установки ее производительность составляет от 25 до 200 м³/час.

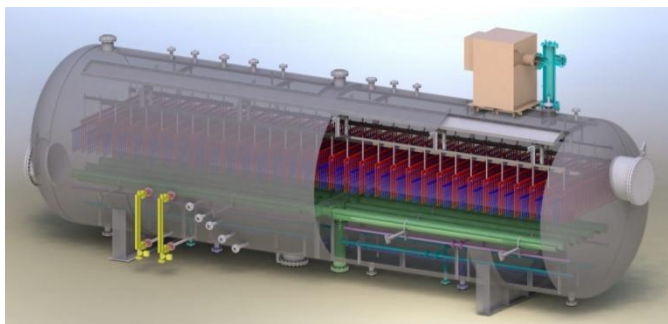


Рис. 3. Электродегидратор

В заключение можно констатировать, что описанный выше концептуально новый подход к решению хронических проблем техники и технологии электродеэмульсации нефти оказался достаточно плодотворным.

Использование в электродегидраторах и электрокоалесцирующих аппаратах композитных резистивных электродов с комплексом заданных электрофизических и физико-химических свойств позволяет:

– исключить возможность коротких замыканий электродов электродегидраторов при обводненности входящего сырья до 20%, электрокоалесцеров – до 40% и более;

– реализовать в электродной зоне электродегидраторов оптимальные конфигурацию электрического поля и режим электрообработки с повышающейся в направлении движения сырья напряженностью поля, согласованные с динамикой одновременно протекающих процессов электрокоалесценции и гравитационного осаждения капель дисперсной водной фазы нефтяной эмульсии;

– реализовать в электрокоалесцерах наиболее благоприятный режим коалесценции с постепенно понижающейся в направлении движения сырья напряженностью электрического поля;

–кратно расширить диапазон обводненностей деэмульгируемых нефтей;

– за счет перечисленных теоретически спрогнозированных и экспериментально подтвержденных преимуществ существенно повысить эффективность и стабильность процесса электродеэмульсации нефти, производительность и надежность аппаратов, а также за счет снижения потребляемых токов повысить энергоэффективность процесса.

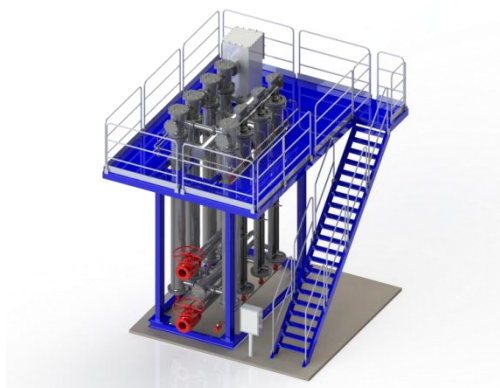


Рис.4. Электрокоалесцирующая установка

В подтверждение сделанных в данной работе выводов следует отметить, что в 2017 году промышленный электродегидратор с композитными электродами прошел опытно-промышленные испытания и введен в эксплуатацию в ОАО «Сургутнефтегаз».

Литература

1. Pat. 987115 U.S. Separating and collection particles of one liquid suspended in another liquid / F.G. Cotrell, J.B.Speed – 1911.
2. Панченков Г.М., Папко В.В. Диспергирование капель воды эмульсии при возникновении коротких замыканий электродов // Нефтяное хозяйство. 1969. № 3. С. 46–47.
3. Reneker D.H., Mattice W.L., Quiker R.P., Kim S.J. Smart Materials and Structures. 1992. V. 1. N 1. P. 84.
4. Newnham R.E. MRS Bull. 1993. V. 18. N 4. P. 24.
5. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. М.: Химия, 1984. 240 с.
6. Филиппов П.Г., Шевченко В.Г., Пономаренко А.Т. и др. // Обзорная информация. Сер. общепромышленные вопросы. М.: НИИТЭХИМ, 1984. Вып. 1 (219). С. 53.
7. Чмутин И.А., Летягин С.В., Шевченко В.Г., Пономаренко А.Т. Электропроводящие полимерные композиты: структура, контактные явления, анизотропия // Высокомолекулярные соединения. 1994. Т. 36, N 4. С. 699–713.
8. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М.: Наука, 1979. 320 с.
9. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: Изд-во Ленингр. ун-ва, 1989. 176 с.

10. Губайдуллин Ф.Р., Сахабутдинов Р.З., Космачева Т.Ф. и др. Эффективность обезвоживания сверхвязкой нефти при воздействии электрического поля / Технологии подготовки сверхвязкой нефти Татарстана. Казань: Центр инновационных технологий, 2015. 280 с.

11. Пат. № 99341 РФ. Электродегидратор // Швецов В.Н., Юнусов А.А. Оpubл. 20.11.2010 г., бюл. № 32.

12. Пат. № 156667 РФ. Электрокоалесцирующая установка // Юнусов А.А., Швецов В.Н. Оpubл. 10.11.2015 г., бюл. № 31.

Авторы публикации

Швецов Владимир Нисонович – канд. техн. наук, с.н.с., генеральный директор ЗАО «Нефтех».

Юнусов Анас Анварович – канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального директора по научной работе ЗАО «Нефтех».

References

1. Pat. 987115 U.S. Separating and collection particles of one liquid suspended in another liquid / F.G. Cotrell, J.B.Speed – 1911.

2. Panchenkov G.M., Papko V.V. Dispergirovanie kapel' vody emul'sii pri vozniknovenii korotkikh замыканий электродов // Neftyanoe khozyaistvo. 1969. N3. S.46–47.

3. Reneker D.H., Matice W.L., Quiker R.P., Kim S.J. // Smart Materials and Structures. 1992. V.1. N1. P. 84.

4. Newnham R.E. // MRS Bull. 1993. V. 18. N 4. P. 24.

5. Gul' V.E., Shenfil' L.Z. Elektroprovodyashchie polimernye kompozitsiii M.: Khimiya, 1984. 240 с.

6. Filippov P.G., Shevchenko V.G., Ponomarenko A.T. i dr. // Obzornaya informatsiya. Ser. obshcheotraslevye voprosy. M.: NIITEKKhIM, 1984. Vyp. 1 (219). S. 53.

7. Chmutin I.A., Letyagin S.V., Shevchenko V.G., Ponomarenko A.T. Elektroprovodyashchie polimernye kompozity: struktura, kontaktnye yavleniya, anizotropiya // Vysokomolekulyarnye soedineniya. 1994. T. 36. N 4. S. 699–713.

8. Ostroumov G.A. Vzaimodeistvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh polei. M.: Nauka, 1979. 320 с.

9. Stishkov Yu.K., Ostapenko A.A. Elektrogidrodinamicheskie techeniya v zhidkikh dielektrikakh. L.: Izd-vo Leningr. univ., 1989. 176 с.

10. Gubaidullin F.R., Sakhabutdinov R.Z., Kosmacheva T.F. i dr. Effektivnost' obezvozhivaniya sverkhvyazkoi nefti pri vozdeistvii elektricheskogo polya / Tekhnologii podgotovki sverkhvyazkoi nefti Tatarstana. Kazan': Tsentr innovatsionnykh tekhnologii, 2015. 280 с.

11. Pat. № 99341 RF Elektrodegidrator. Shvetsov V.N., Yunusov A.A. Opubl. 20.11.2010 g., byul. № 32.

12. Pat. № 156667 RF Elektrokoalestsiruyushchaya ustanovka. Yunusov A.A., Shvetsov V.N. Opubl. 10.11.2015 g., byul. № 31.

Authors of the publication

Vladimir N. Shvetsov – cand. sci. (techn.), senior researcher, General Director CJSC “Neftech”.

Anas A. Yunusov – cand. sci. (techn.), associate professor, Deputy General Director for Scientific Work CJSC “Neftech”.

Поступила в редакцию

22 января 2018 года.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.311

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Е.И. Грачева, И.И. Ильясов, А.Н. Алимова

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: В статье представлено сравнительное исследование и анализ некоторых наиболее распространенных методов расчета потерь электроэнергии с выявлением основных достоинств и недостатков, присущих каждому из рассматриваемых методов. Предложена классификация основных детерминированных и вероятностно-статистических методов оценки потерь электроэнергии в зависимости от способа получения исходных данных, используемой математической модели и от режима получения исходных данных. Определены области использования методов расчета потерь в зависимости от исходной информации, принятых допущений и возможных ожидаемых погрешностей расчета. Выявлены основные особенности и разработаны рекомендации по применению вероятностных и детерминированных методов.

Ключевые слова: потеря электроэнергии, детерминированный метод, вероятностно-статистический метод, достоинство и недостаток, погрешность расчета.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-62-71

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

E.I. Gracheva, I.I. Ilyasov, A.N. Alimova

Kazan state energetic university, Kazan, Russia

Abstract: In article the comparative research and the analysis of some most widespread methods of calculation of losses of the electric power with detection of the main merits and demerits inherent in each of the considered methods is provided. Classification of the mains determined, and probable statistical techniques of a loss estimate of the electric power depending on a method of receiving basic data is offered, to the used mathematical model and from the mode of receiving basic data. The fields of use of methods of calculation of losses depending on the initial information, the accepted assumptions and the possible expected calculation errors are defined. The key features are revealed and recommendations about application of the probable and determined methods are developed.

Keywords: loss of the electric power, the determined method, probable statistical technique, advantage and shortcoming, calculation error.

Введение

В связи с развитием рыночных отношений в области электроэнергетики значимость проблемы определения потерь электроэнергии заметно возросла, так как стоимость потерь является одной из составляющих тарифа на электроэнергию (ЭЭ). Точное определение уровня потерь ЭЭ является одной из важных составляющих общего комплекса энергосберегающих мероприятий на промышленном предприятии.

Цель анализа состоит в выявлении основных достоинств и недостатков некоторых методов определения потерь ЭЭ в сетях промышленного электроснабжения, а также в классификации данных методов в зависимости от объема исходной информации и режима ее получения.

Сравнительный анализ методов расчета потерь электроэнергии

Задачей исследования является сравнительный анализ методов определения потерь ЭЭ, составление их классификации, выявление достоинств и недостатков данных методов, выдача рекомендаций по применению тех или иных методов расчета, а также определение области применения рассмотренных методов определения потерь ЭЭ в зависимости от исходной информации, принятых допущений и возможных ожидаемых погрешностей расчета.

На данный момент можно выделить следующие два способа определения расходов ЭЭ в промышленных сетях 0,4 кВ – это расчётный и экспериментальный. Экспериментальный способ определения расхода ЭЭ не пользуется популярностью, так как имеет ряд недостатков [2; 3]:

- для достижения результата необходима установка значительного количества измерительных комплексов (ИК);
- трудоемкость процесса получения информации;
- длительность исследований;
- неустойчивость результатов при модернизации оборудования;
- относительно большие материальные затраты;
- необходимость обработки полученных данных;
- погрешность измерительных приборов и ИК;
- погрешность снятия показаний (человеческий фактор).

Таким образом, широкое распространение получили расчётные методы определения нагрузочных потерь ЭЭ. Предлагаемая классификация методов расчета потерь ЭЭ показана на рис.

Классификация методов расчёта потерь электроэнергии

Выделяют детерминированные и вероятностно-статистические методы расчёта потерь ЭЭ в сетях промышленного электроснабжения 0,4 кВ. К детерминированным относятся следующие методы.

Метод поэлементного расчёта [1] использует следующую формулу:

$$\Delta W_H = 3 \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^k R_i \sum_{j=1}^{T/\Delta t} I_{ij}^2,$$

где k – число элементов сети; I_{ij} – токовая нагрузка элемента сопротивлением R_i в момент времени j ; Δt – периодичность опроса датчиков, фиксирующих токовые нагрузки элементов.

Исходная информация поступает по данным телеизмерений. Наиболее сложной и неоднозначной проблемой формирования исходной информации является определение независимых параметров текущего режима сети, что связано с проблемой оснащения устройствами телеметрии всех потребителей ЭЭ. То есть реализация поэлементного расчёта в реальном времени возможна только в случае автоматизации расчёта потерь мощности и

ЭЭ в сетях 0,4 кВ. Однако данный метод позволяет получить наиболее достоверные результаты, так как учитывает характер изменения параметров режима.

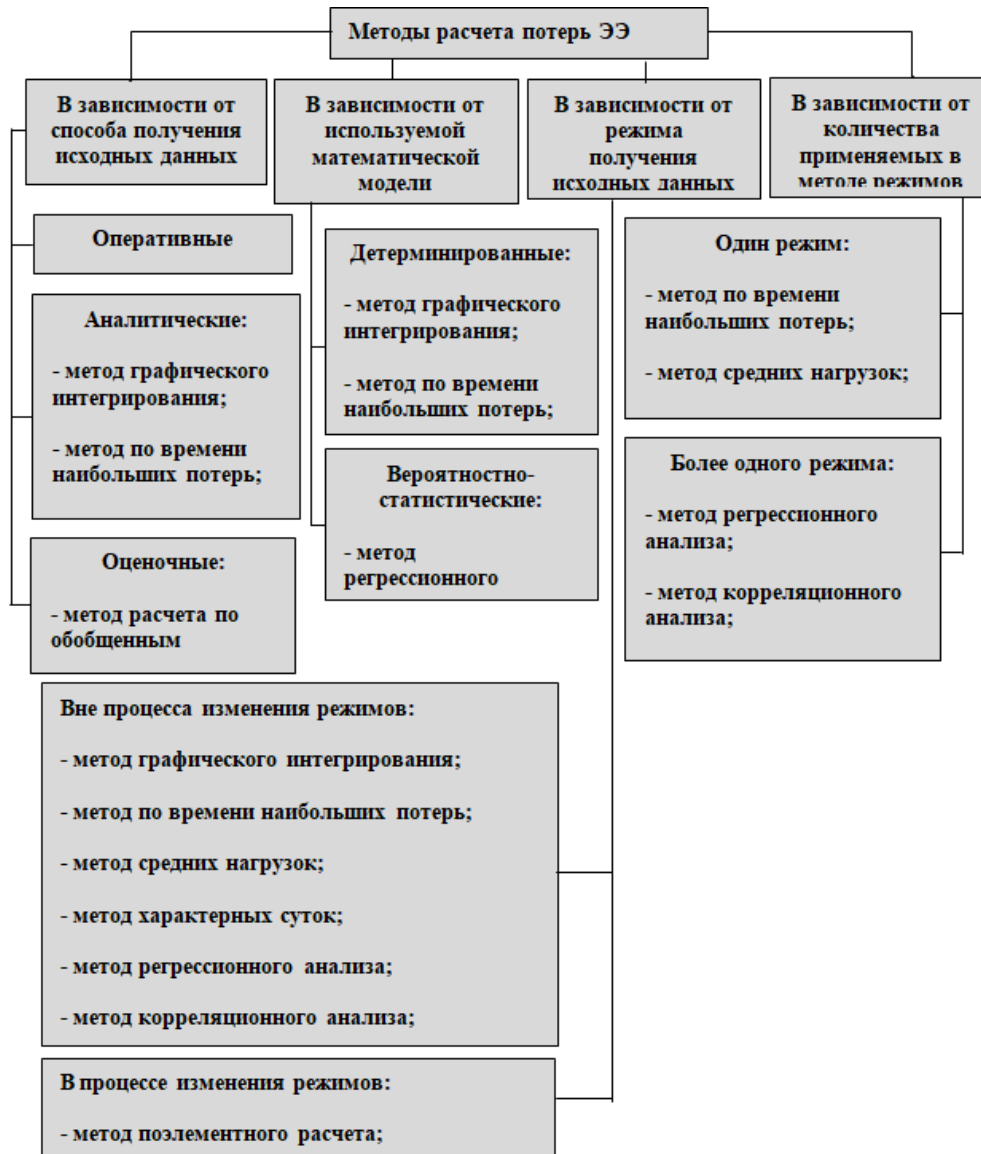


Рис. Классификация методов расчета потерь электроэнергии

Метод по времени наибольших потерь τ [1–3] использует следующую формулу:

$$\Delta W_H = \tau \cdot \Delta P_{нб},$$

где ΔP – потери мощности в режиме максимальной нагрузки сети; τ – время наибольших потерь.

Этот метод основан на расчёте потерь мощности в одном режиме максимальной нагрузки и умножения значения на число часов максимальных потерь τ . Значение τ рассчитывается по графику нагрузки. Процесс расчёта данным методом не связан по

времени с реальным режимом сети, что позволяет решать задачи анализа потерь, выбора мероприятий по их снижению, разработке нормативной характеристики потерь ЭЭ.

Метод средних нагрузок [4]. Данный метод является одним из информационно-достоверных методов определения потерь ЭЭ. Технологически он близок к методу τ и исходит из определения потерь мощности только в одном режиме средних нагрузок. Потери ЭЭ определяются по формуле

$$\Delta W_H = T \cdot \Delta P_{\text{ср}} \cdot k_{\Phi}^2,$$

где $\Delta P_{\text{ср}}$ – потери мощности в сети при средних нагрузках узлов (или сети в целом) за время T ; k_{Φ} – коэффициент формы графика мощности или тока.

Метод характерных суток [4]. Данный метод использует те же данные, что и метод средних нагрузок, а также данные замеров суточных графиков нагрузки в узлах в зимний и(или) летний день контрольных замеров. Потери ЭЭ определяются по следующей формуле:

$$\Delta W_H = \sum_{i=1}^m \Delta W_{H_i}^C \cdot D_{\text{эки}},$$

где m – число характерных суток, потери ЭЭ за каждым из которых, рассчитанные по известным значениям графика нагрузки в узлах сети, составляют $\Delta W_{H_i}^C$; $D_{\text{эки}}$ – эквивалентная продолжительность в году i -го характерного графика (число суток).

Достоинством данного метода является достоверность исходной информации, так как данные посуточного энергопотребления регистрируются на уровне диспетчерской службы.

Метод расчёта по обобщенным параметрам сети [1]. Данный метод заключается в расчёте потерь ЭЭ на основе зависимостей потерь от суммарной длины и количества линий, а также суммарной мощности, полученных на основе проектной документации или статистических данных.

$$\Delta W_F = 9,3 \cdot \frac{W_F^2 \cdot (1 + \text{tg}^2 \varphi) \cdot k_{\Phi}^2 \cdot L_F}{N_F \cdot D \cdot F} \cdot k_{\text{нec}} \cdot k_{\text{отв}} \cdot k_L \cdot k_N,$$

где ΔW_F – суммарная энергия, отпускаемая в N_F линии сечением головных участков F и суммарной длиной L_F за D дней; k_{Φ}^2 – коэффициент формы графика нагрузки; k_N – повышающий коэффициент, учитывающий неодинаковость плотностей тока на головных участках различных линий; k_L – коэффициент, учитывающий влияние на потери распределенности нагрузок вдоль линии; $k_{\text{нec}}$ – коэффициент увеличения потери явления с несимметричной нагрузкой фаз; $k_{\text{отв}}$ – коэффициент, учитывающий наличие ответвлений.

Среди вероятностно-статистических можно выделить следующие наиболее распространённые методы определения потерь ЭЭ:

Метод регрессионного анализа [3]. В данном методе необходим исходный объем статистической информации о потерях и воздействующих факторах, также необходимы параметры элементов сети и параметры режима. Расчёт потерь ЭЭ производится на основании суммирования почасовых значений потерь мощности и определяется по выражению

$$\Delta W_{\Delta T} = \sum_{i=1}^{\Delta T / \Delta t} \Delta P_i \cdot \Delta t = b_0 \cdot \Delta t + \sum_{k=1}^{\Phi} b_k \cdot W_k + \sum_{k=1}^{\Phi} b_{kk} \cdot \sum_{i=1}^{\Delta T / \Delta t} P_{ki}^2 \cdot \Delta t_i,$$

где $\Delta W_{\Delta T}$ – потери ЭЭ за время ΔT ; Δt – интервал замера, обычный равный одному часу; W_k – ЭЭ за период ΔT для k -го фактора, входящего в уравнение регрессии; ΔP_i – потери мощности в i -й час; P_{ki} – мощность для k -го фактора в i -й час расчётного периода; b_0 , b_k , b_{kk} – коэффициенты уравнения регрессии; Φ – число факторов.

Метод регрессионного анализа позволяет получить уравнения регрессии, связывающие потери с воздействующими факторами. Недостатком является то, что информация о параметрах режима является неполной и ограниченно-достоверной (аппаратура, на которой производятся замеры, дает определённую погрешность; замеры производятся не одновременно на всех подстанциях).

Метод корреляционной связи [3]. Исходными данными являются основные влияющие факторы, их число, статистические данные. Данный метод основан на уравнении корреляционной связи:

$$\Delta W = b_0 + b_1 \cdot X_1 + \dots + b_m \cdot X_m + \varepsilon,$$

где m – число основных влияющих факторов; X – влияющие факторы; ε – доля потерь ЭЭ, зависящая от второстепенных факторов.

Данный метод позволяет выявить четыре-пять основных влияющих факторов. Влияя на данные значимые факторы (т.е. проводя мероприятия по снижению потерь ЭЭ), можно добиться снижения потерь ЭЭ.

Метод случайной выборки [3]. Потери ЭЭ во всех N линиях определяют по формуле

$$M[\Delta W_N] = M[\Delta W_1] \cdot N,$$

где $M[\Delta W_1]$ – математическое ожидание потерь в одной линии.

Данный метод используется, например, при необходимости определения суммарных потерь в N линиях на основании непосредственного расчета потерь только в части из них. При этом общее число линий называют генеральной совокупностью, а рассчитываемую часть – выборкой. Задача формулируется следующим образом: определить минимальный объем выборки, достаточный для определения математического ожидания потерь с заданной точностью и достоверностью.

Достоинства и недостатки некоторых методов определения потерь ЭЭ представлены в табл. 1 [5; 6].

Таблица 1

Достоинства и недостатки методов расчета потерь		
Метод расчета потерь электроэнергии	Достоинства	Недостатки
Детерминированные методы		
Метод поэлементного расчета $\Delta W_H = 3 \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^k R_i \sum_{j=1}^{T/\Delta t} I_{ij}^2$	Позволяет учитывать характер изменения параметров режима, а также позволяет получить наиболее достоверные результаты	Необходимо оснащение устройствами всех потребителей ЭЭ, невозможен учет фактического сопротивления проводов
Метод по времени наибольших потерь $\Delta W_H = \tau \cdot \Delta P_{нб}.$	Позволяет решать задачи анализа потерь, выбора мероприятий по их снижению, разработки нормативных характеристик потерь ЭЭ	Низкая достоверность в определении τ

Метод средних нагрузок $\Delta W_H = T \cdot \Delta P_{\text{ср}} \cdot k_{\Phi}^2,$	Позволяет учесть форму графика нагрузки	Необходимо оснащение устройствами телеметрии всех потребителей ЭЭ
Метод характерных нагрузок $\Delta W_H = \sum_{i=1}^m \Delta W_{ni}^C \cdot D_{\text{эки}},$	Достоверность исходной информации	Расчет возможен только при наличии телеинформации о нагрузках
Метод расчета по обобщенным параметрам сети $\Delta W_F = 9,3 \cdot \frac{W_F^2 \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \cdot k_{\Phi}^2 \cdot L_F}{N_F \cdot D \cdot F} \cdot k_{\text{нсс}} \cdot k_{\text{отв}} \cdot k_L \times k_N,$	Позволяет охарактеризовать схемы сетей количественными показателями, легко определяемыми на основе объективных данных	Идеализированная схема не всегда соответствует реальной и её анализ более трудоёмок, чем ввод реальной схемы в компьютер для проведения точного расчета
Вероятностно-статистические методы		
Метод регрессионного анализа $\Delta W_{\Delta T} = \sum_{i=1}^{\frac{\Delta T}{\Delta t}} \Delta P_i \cdot \Delta t$ $= b_0 \cdot \Delta t + \sum_{k=1}^{\Phi} b_k \cdot W_k + \sum_{k=1}^{\Phi} b_{kk} \cdot \sum_{i=1}^{\frac{\Delta T}{\Delta t}} P_{ki}^2 \cdot \Delta t_i,$	Позволяет получить уравнение регрессии, связывающее потери с действующими факторами	Информация о параметрах режима является неполной и ограничена достоверной
Метод случайной выборки $M[\Delta W_N] = M[\Delta W_1] \cdot N,$	Отсутствие необходимости в какой бы то ни было информации обо всех схемах, кроме тех, которые включены в выборку	Большой объем выборки, требуемый для удовлетворения заданных условий точности определения потерь ЭЭ
Метод корреляционной связи $\Delta W = b_0 + b_1 \cdot X_1 + \dots + b_m \cdot X_m + \varepsilon,$	Позволяет выявить 4–5 основных влияющих факторов	Сложность и большой объем математических операций, не позволяет наметить конкретные мероприятия по снижению потерь ЭЭ

В ходе анализа некоторых методов определения потерь ЭЭ в низковольтных сетях промышленного электроснабжения выявлены достоинства и недостатки. Причиной таких результатов является недостоверность получения исходной информации, а также сложные математические вычисления, которые могут привести к значительной погрешности. Среди прочих причин можно выделить также то, что методы не учитывают все влияющие факторы. В свою очередь, их учет может повысить точность расчета. Также в ходе анализа предложена классификация методов определения потерь ЭЭ.

Области применения и некоторые особенности детерминированных и вероятностно-статистических методов расчета потерь электроэнергии

Можно указать следующие области применения и некоторые особенности детерминированных и вероятностно-статистических методов расчета потерь ЭЭ.

1. В зависимости от используемой для расчета информации можно выделить среди детерминированных методов методы расчета по времени потерь, эквивалентирования и методы, основанные на поэлементном расчете сетей. Каждый из этих методов имеет свою область применения и точность расчета.

2. Использование методов по времени потерь требует большого количества исходных данных.

3. Методы эквивалентирования имеют погрешности при «сворачивании» схемы сети.

4. Метод $K_{мн}$ требует выполнения одновременных замеров напряжения и токов. Неучет конфигурации сети, распределения нагрузок, коэффициента мощности может приводить к дополнительным погрешностям результатов.

5. Методы поэлементного расчета позволяют достичь высокой точности расчетов и могут использоваться в качестве эталонных для исследования погрешностей приближенных методов. Однако для их практического применения требуется подготовка большого объема исходной информации, что возможно только на базе современных информационных технологий [7–9].

Вероятностно-статистические методы расчета позволяют получить определенные сведения о параметре, зависящем от комплекса других параметров. Причем аналитический вид искомой зависимости либо неизвестен, либо настолько сложен, что применение её в дальнейших расчетах может быть затруднено. В этом случае приходится использовать способы упрощенного, более наглядного представления зависимости. Естественным желанием является выявить оптимальные упрощения, вносящие как можно меньшую погрешность при как можно большей простоте и наглядности получаемой формулы.

При выборе метода решения задачи можно пользоваться следующими рекомендациями.

1. Если известен ряд значений результирующего параметра и соответствующие им значения факторов, от которых зависит результирующий параметр, а из физических представлений об их зависимости можно предположить её вид (линейная, квадратичная, полиномиальная и т.п.), то наилучшие значения коэффициентов этой зависимости выявляют методом наименьших квадратов.

2. При использовании метода наименьших квадратов предполагается, что зависимость строится от всех намеченных факторов. На практике может встречаться задача, в которой ряды значений результирующего параметра и факторов известны, однако неизвестно, все ли факторы оказывают существенное влияние на значение результирующего параметра и все ли их стоит учитывать в упрощенной зависимости. Выбор значимых факторов осуществляет аппарат факторного анализа. Существенным аспектом является то, что этот аппарат анализирует значимость только линейной связи. После выбора значимых факторов (они, как правило, удовлетворяют условию

независимости) значения коэффициентов линейной зависимости параметра от этих факторов определяют методом наименьших квадратов.

3. Если ряды соответствующих друг другу значений неизвестны, то возникает задача их получения. Если значения каждого ряда взаимно независимы, то получение этих значений не вызывает трудностей – необходимо произвести столько расчетов, сколько нужно для получения искомой величины с заданной точностью и достоверностью.

Например, если ставится задача выявления зависимости потерь в линиях разомкнутых сетей от суммарной длины участков линий и установленных коммутационных аппаратов на линии, то ясно, что потери в конкретной линии не зависят от количества коммутационных аппаратов в другой линии. Поэтому для каждой линии отдельно рассчитывают три величины: потери, суммарную длину участков и количество коммутационных аппаратов, из физических представлений устанавливают вид зависимости и затем определяют численные значения входящих в нее коэффициентов методом наименьших квадратов. Если однозначных представлений о виде зависимости нет, то может быть намечено несколько формул. Коэффициенты в каждой из них определяют методом наименьших квадратов, вычисляют среднеквадратические ошибки каждой формулы и выбирают формулу с наименьшими значениями ошибки.

4. В ряде задач факторы оказываются существенно зависимыми друг от друга, что не позволяет осуществлять их раздельный анализ.

Например, если необходимо выявить зависимость потерь ЭЭ в конкретной сети от нагрузок потребителей, то ясно, что зависимость их от нагрузки любого конкретного потребителя будет различной при различных нагрузках других потребителей. Необходимым условием этой задачи является учет взаимного влияния факторов. Использование же ограниченного количества расчетов, проведенных при сочетаниях, установленных волевым порядком, не гарантирует того, что эти сочетания достаточно хорошо отражают всю возможную совокупность сочетаний. В задачах такого рода следует применять метод планирования эксперимента, который как раз и определяет, какие сочетания значений факторов следует рассмотреть, чтобы выявить закономерности, характерные для всей совокупности сочетаний. К таким задачам относится и задача определения потерь ЭЭ в цеховых сетях, для которых характерно наличие большого числа параметров, влияющих на потери ЭЭ [5].

Как показали проведенные исследования [10], погрешности некоторых наиболее распространенных методов определения потерь ЭЭ могут достигать 50 и более процентов (табл. 2).

Таблица 2

Возможные погрешности методов определения потерь

Метод расчета	Погрешность расчета, %	Причины погрешности
Метод графического интегрирования	-28	Неучет нагрева проводов, сопротивлений аппаратов
По времени наибольших потерь τ	-39	Неточность определения величины τ
По методу эквивалентных преобразований	-46	Принцип эквивалентирования
По методу 2 τ	-29	Неточность определения $\Delta R_{\text{нб}}$, $\Delta R_{\text{нм}}$
По среднеквадратичным нагрузкам	+21	Неучет формы графика нагрузки
По уравнению регрессии	+4	Неточность определения коэффициентов полинома

На данном этапе развития энергетической отрасли вышеперечисленные методы определения потерь ЭЭ не удовлетворяют современным требованиям. Точное определение уровня потерь ЭЭ и мероприятия, направленные на их снижение в распределительных сетях

промышленных предприятий, являются самыми важными составляющими рационального использования энергетических ресурсов [11–13].

Выводы

Проведено сравнительное исследование и анализ некоторых методов расчета потерь электроэнергии с обнаружением основных достоинств и недостатков, присущих каждому из рассмотренных методов. Предложена классификация методов расчета потерь электроэнергии. Определены области использования методов расчета потерь в зависимости от исходной информации, принятых допущений и возможных ожидаемых погрешностей расчета. Разработаны рекомендации по применению вероятностно-статистических и детерминированных методов.

Литература

1. Грачева Е.И. Потери электроэнергии в низковольтных сетях. Казань: КГЭУ, 2004. 127 с.
2. Федоров О.В., Дарьенков А.Б. Энергосберегающая политика: монография. М.: КноРус, 2015. 294 с.
3. Федоров О.В. Аспекты ресурсобеспечения новых технологических укладов: монография, М.: ИНФРА-М, 2017. Научная мысль. 166 с.
4. Немцев А.Г., Федоров О.В., Шестакова Л.А. О вибрации электродвигателей при наличии высших гармонических составляющих в напряжении источника питания // Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах. 2014. С. 330–332.
5. Аполлонский С.М., Куклев Ю.С. Надежность и эффективность электрических аппаратов: учебное пособие. СПб.: Лань, 2011. 443 с.
6. Graovac D., Katic V., Rufer A. Universal power quality system – an extension to universal power quality conditioner // international conference on power electronics and motion control. 2000. № 4. P. 32–38.
7. Wang Feng, Qi Yanpeng, Fu Zhengcai, et al. Reliability Evaluation of Distribution System Based on Modified Failure Mode and Effect Analysis Method. Low Voltage Apparatus, 2013. № 1. P. 37–42
8. Guo Xian, Guo He, Cheng Haozhong, et al. Optimal Architecture Planning of Microgrid Considering User Outage Costs. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014. № 29 (8).P. 301–306.
9. Ajami A., Hosseini S.H. Implementation of Novel Control Strategy for Shunt Active Filter // Ecti transactions on electrical eng., electronics and communications. 2006. № 1. P. 40–46.
10. Erickson R.W. Some Topologies of High Quality Rectifiers // First International Conference on Energy, Power and Motion Control. 1997. P. 1–6.
11. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. 2017. 167 с.
12. Дарьенков А.Ф. Пути повышения надежности энергосбережения страны // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 83. № 3. 214 с.
13. Федоров О.В., Татарских Б.Я., Якушева А.М. Приоритетные отрасли новых технологических укладов: монография. М.: КноРус, 2016. 280 с.
14. Esmaeilian H.R., Fadaeinedjad R. “Energy Loss Minimization in Distribution Systems Utilizing an Enhanced Reconfiguration Method Integrating Distributed Generation,” IEEE Syst. J., IEEE, 2014. P. 1–10.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ильясов Ильдар Ильнурович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Алимова Алсу Нурхайдаровна – магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Gracheva E.I. Poteri elektroenergii v nizkovol'tnykh setyakh. Kazan': KGEU. 2004. 127 s.
2. Energoberegayushchaya politika. O.V. Fedorov, A.B. Dar'enkov. Moskva, 2015. Monografiya. M.: KnoRus, 2015. 294 s.
3. Aspekty resursoobespecheniya novykh tekhnologicheskikh ukladov. O.V. Fedorov. Monografiya. 2M.: INFRA-M 2017 Nauchnaya mysl'. 166 s.
4. Nemtsev A.G., Fedorov O.V., Shestakova L.A. O vibratsii elektrodvigately pri nalichii vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh v napryazhenii istochnika pitaniya // Trudy VIII mezhdunarodnoi (XIX vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014 v 2-kh tomakh. 2014. S. 330–332.
5. Apollonskii S.M. Nadezhnost' i effektivnost' elektricheskikh apparatov: uchebnoe posobie / S.M. Apollonskii, Yu.V. Kuklev. SPb.: Lan', 2011. 443 s.
6. Graovac D., Katic V., Rufer A. Universal power quality system – an extension to universal power quality conditioner // international conference on power electronics and motion control. 2000. № 4. P. 32–38.
7. Wang Feng, Qi Yanpeng, Fu Zhengcai, et al. Reliability Evaluation of Distribution System Based on Modified Failure Mode and Effect Analysis Method. Low Voltage Apparatus, 2013. № 1. P. 37–42
8. Guo Xian, Guo He, Cheng Haozhong, et al. Optimal Architecture Planning of Microgrid Considering User Outage Costs. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014. № 29 (8).P. 301–306.
9. Ajami A., Hosseini S.H. Implementation of Novel Control Strategy for Shunt Active Filter // Ecti transactions on electrical eng., electronics and communications. 2006. № 1. P. 40–46.
10. Erickson R.W. Some Topologies of High Quality Rectifiers // First International Conference on Energy, Power and Motion Control. 1997. P. 1–6.
11. Gracheva E.I., Naumov O.V. Poteri elektroenergii i effektivnost' funktsionirovaniya oborudovaniya tsekhovykh setei, 2017. 167 s.
12. Dar'enkov A.F. Puti povysheniya nadezhnosti energosberezheniya strany // Vestnik Rossiiskoi akademii nauk. 2012. T. 83. № 3. 214 c.
13. Fedorov O.V., Tatarskikh B.Ya., Yakusheva A.M. Prioritetnye otrasli novykh tekhnologicheskikh ukladov: monografiya. M.: KnoRus, 2016. 280 s.
14. Esmaeilian H.R., Fadaeinedjad R. “Energy Loss Minimization in Distribution Systems Utilizing an Enhanced Reconfiguration Method Integrating Distributed Generation,” IEEE Syst. J., IEEE, 2014. P. 1–10.

Authors of the publication

Gracheva Elena Ivanovna – doctor of engineering sciences, Professor of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

Ilyasov Ildar Ilnurovich – postgraduate student of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

Alimova Alsu Nurkaydarovna – graduate student of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

Поступила в редакцию

22 февраля 2018 года.

УДК 62-932

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ НАГРУЗКИ ПРОВОДНИКА
ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ ХАРАКТЕРЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА**

***Д.Ж. Байбагысова¹, А.К. Кадиева¹, Ч.А. Кадыров², З.А. Узагалиев³**
***baibagysova_d@iuca.kg**

**¹Филиал имени академика Х.А. Рахматулина в городе Токмок Кыргызского
государственного технического университета имени И. Раззакова**

г. Токмок, Кыргызская республика

²Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

г. Бишкек, Кыргызская республика

³Открытое акционерное общество «Северэлектро»

г. Бишкек, Кыргызская республика

***Резюме:** В данной работе предлагается автоматизированный лабораторный стенд для оценки расчетного тока и исследования адекватности рассматриваемой математической модели перегрева провода относительно температуры окружающей среды. Рассматривается разработанная структурная схема модели, описывающая перегрев проводника относительно температуры окружающей среды. Модель состоит из шести блоков, в которых в процессе моделирования реализуются операции: имитация тока нагрузки, изменяющегося по стохастическому закону; интегрирование соответствующих дифференциальных уравнений; определение расчетных токов и вывод результатов моделирования. При разработке компьютерной модели нагрева проводника была принята схема тепловых процессов в проводнике, описанная в научных публикациях. Моделирование производилось в среде Simulink.*

***Ключевые слова:** автоматизированный лабораторный стенд, расчетная нагрузка, моделирование, нагрев проводника, стохастический характер изменения тока, Simulink.*

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-72-81

**COMPUTER SIMULATION OF THE HEATING PROCESS AND THE
DETERMINATION OF THE CALCULATED LOAD OF THE CONDUCTOR UNDER
STOCHASTIC CHARACTER OF CURRENT CHANGE**

D.J. Baibagysova¹, A.K. Kadieva¹, Ch.A. Kadyrov², Z.A. Uzagaliev³

**¹The branch named after academician H. A. Rakhmatulina in Tokmok of the Kyrgyz state
technical University named after I. Razzakov,**

Tokmok, Kyrgyz Republic

²The Kyrgyz state technical University named after I. Razzakov,

Bishkek, Kyrgyz Republic

³Open joint-stock company "Severelektro", Bishkek, Kyrgyz Republic

***Abstract:** In this article we propose an automated laboratory bench for the evaluation of the current and the study of the adequacy of this mathematical model overheating of the wire relative to the environment. Is developed the structural diagram of model describing the overheating of the conductor relative to the environment. The model consists of six blocks in which modeling operations are implemented: the simulation of the load current, is given by the stochastic law; the*

integration of the corresponding differential equations; the definition of the calculated currents and the output of simulation results. In developing a computer model of heating of the conductor adopted a scheme of thermal processes in the conductor, described in scientific publications. The simulation was performed in Simulink.

Keywords: *automated laboratory bench, the calculated load, the simulation, heating conductor, the stochastic character of current change, Simulink.*

Введение

Эффективное исследование случайных процессов изменения различных физических величин в электроэнергетических системах и системах электроснабжения возможно с применением методов теории моделирования [1]. Такой подход при решении одних задач позволяет существенно снизить трудозатраты и время получения нужных результатов, а при решении других задач оказывается единственным. Актуальным в этой области является решение проблемы расчета электрических нагрузок (РЭН) с привлечением физических моделей электроприемников (ЭП), которые бы управлялись компьютером в реальном масштабе времени (а также ускоренно) в соответствии с моделированными графиками нагрузок. При этом возможен анализ температуры нагрева изоляции токопроводящих элементов сети для определения расчетной нагрузки.

Важность более точного определения расчетной нагрузки объясняется тем, что занижение расчетных нагрузок приводит к перегревам элементов систем электроснабжения и ускоренному их износу, завышение расчетных нагрузок – к излишним капиталовложениям и затратам на системы электроснабжения. Из сказанного ясна необходимость разработки и внедрения в практику проектирования систем электроснабжения научно обоснованных инструментариев для исследования адекватности различных методов оценки электрических нагрузок при стохастическом характере изменения тока нагрузки.

Методы

Ввиду многообразия электрических нагрузок существует большое число различных методов РЭН (эмпирические, аналитические) [2–4], применяемых в тех или иных случаях. Но сказать о том, что задача РЭН решена, нельзя, так как большинство существующих методов расчёта не могут дать требуемой точности [3].

Основой аналитических методов РЭН являются математические модели электрических нагрузок [5–7] и тепловые модели проводников [8–10].

Известно, что расчетная нагрузка реализуется в период наиболее загруженной смены. При этом, исключая начало и конец смены, а также обеденный перерыв, получают установившийся однородный процесс, который можно классифицировать как стационарный эргодический. Однако процесс изменения нагрузки во времени математически наиболее полно отражается в понятии нестационарного случайного процесса. Нагрузка в каждый момент времени является случайной величиной, закон распределения которой может изменяться со временем.

В данной работе предлагается автоматизированный лабораторный стенд [11] для оценки расчетного тока и исследования адекватности рассматриваемой математической модели перегрева провода относительно температуры окружающей среды. Кроме этого, рассмотрено моделирование процесса нагрева проводника в среде *Simulink* и оценка расчетной нагрузки при стохастическом характере изменения тока.

При разработке компьютерной модели нагрева проводника со стохастическим характером изменения протекающего по нему тока, была принята схема тепловых процессов в проводнике, изложенная в работе [12], согласно которой подобная схема допустима для проводников заводских сетей.

Условие теплового баланса для трехжильного кабеля, открыто проложенного внутри помещения, при токе нагрузки $I(t)$ в амперах имеет вид [12]:

$$3I^2 R_0(1+\alpha)dt = Cd\vartheta + A\vartheta dt, \quad (1)$$

где R_0 – активное сопротивление жилы проводника при температуре 20°C , Ом; α – температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$; C – теплоемкость проводника или кабеля, Дж/ $^\circ\text{C}$; A – коэффициент теплоотдачи, учитывающий суммарную отдачу тепла в окружающую среду за счет теплопроводности, конвекции и лучеиспускания, Вт/ $^\circ\text{C}$.

Из формулы (1) следует уравнение, описывающее перегрев проводника относительно температуры окружающей среды:

$$\frac{C}{A} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + \left(1 - 3I^2 \frac{\alpha R_0}{A}\right) \vartheta = 3I^2(t) \frac{R_0}{A}. \quad (2)$$

Согласно [12], рост значения коэффициента теплоотдачи практически компенсирует одновременное возрастание сопротивления $R = R_0(1+\alpha\vartheta)$; поэтому в этой работе рассмотрено два предельных допущения:

1) $\alpha = 0.0039$; $A \approx \text{const} = A_1$;

2) $\alpha \approx 0$; $A \approx \text{const} = A_0$.

Тогда уравнение (2) примет, соответственно, следующий вид:

$$\frac{C}{A_1} \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} + \left(1 - 3I^2(t) \frac{\alpha R_0}{A_1}\right) \vartheta_1 = 3I^2(t) \frac{R_0}{A_1}; \quad (3,a)$$

$$\frac{C}{A_0} \cdot \frac{d\vartheta_0}{dt} + \vartheta_0 = 3I^2(t) \frac{R_0}{A_0}. \quad (3,b)$$

Интегралы $\vartheta_1(t)$ и $\vartheta_0(t)$ являются приближениями к действительному перегреву $\vartheta(t)$. При этом $\vartheta_1(t)$ будет давать несколько повышенные значения наибольшего перегрева ϑ_M [12].

Положив в уравнениях (3) $I = \text{const} = I_N \sum$; $\vartheta = \text{const} = \vartheta_N$, найдено значение постоянных $A_1 = \frac{3I_N^2}{J_N} R_0(1+\alpha\vartheta_N)$; $A_0 = \frac{3I_N^2}{\vartheta_N} R_0$; подставив их в уравнения (3), получено [12]:

$$\lambda_1 T_0 \frac{d\vartheta_1}{dt} + \vartheta_1 = \lambda_1 \vartheta_N \left(\frac{I(t)}{I_N} \right)^2; \quad (4,a)$$

$$T_0 \frac{d\vartheta_0}{dt} + \vartheta_0 = \vartheta_N \left(\frac{I(t)}{I_N} \right)^2, \quad (4,b)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{1}{1 + \alpha \vartheta_N \left[1 - \left(\frac{I(t)}{I_N} \right)^2 \right]} \\ T_0 &= \frac{C}{A_0} = \frac{C \vartheta_N}{3 I_N^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

T_0 – постоянная времени нагрева проводника; I_N – длительно допустимая нагрузка; ϑ_N – длительно допустимая температура перегрева в нормальном режиме. Связь между T_0 и I_N показана на рис. 1 [12].

Для удобства выполнения расчета I_p по заданному графику $I(t)$ [12], значения перегрева ϑ_1, ϑ_0 заменено в выражениях (4,а) и (4,б) прямо пропорциональными им вспомогательными переменными z_1, z_0 согласно формулам:

$$\vartheta_1 = z_1 \frac{\vartheta_N}{I_N^2}, \quad \vartheta_0 = z_0 \frac{\vartheta_N}{I_N^2}. \quad (6)$$

Следовательно, уравнение (4) перейдет в следующие выражения [12]:

$$\lambda_1 T_0 \frac{dz_1}{dt} + z_1 = \lambda_1 I^2(t), \quad (7,а)$$

$$T_0 \frac{dz_0}{dt} + z_0 = I^2(t). \quad (7,б)$$

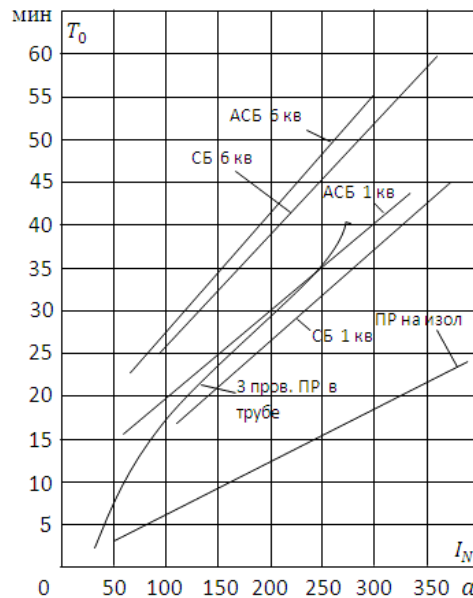


Рис. 1. Связь между постоянной времени нагрева T_0 проводов и кабелей и длительно допустимой нагрузкой I_N

Для вычисления по графику нагрузки расчетного тока $I(t)$ по пику температуры можно воспользоваться формулами [12]:

$$I_{pI}^{(0)} = \sqrt{\frac{z_{0M}}{\beta_1}}, \quad (8)$$

$$I_{pI}^{(1)} = \sqrt{\frac{(1 + \beta_1 \alpha \vartheta_N) z_{1M}}{\beta_1 \left(1 + \alpha \vartheta_N \frac{z_{1M}}{I_N^2} \right)}}, \quad (9)$$

где β_1 – допустимая кратность перегрева жилы проводника; z_{1M} , z_{0M} , – соответственно наибольшие ординаты функций $z_{1(t)}$, $z_{0(t)}$. Они являются интегралами дифференциальных уравнений (7,а), (7,б).

Результаты

Предложенная в работе [13] структурная схема модели, описывающая перегрев проводника относительно температуры окружающей среды, показана на рис.2. В процессе моделирования, в соответствующих блоках *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, реализуются следующие операции: *a* – моделирование тока нагрузки $I(t)$, изменяющегося по стохастическому закону; *b*, *c* – интегрирование дифференциальных уравнений, соответственно, (7,а) и (7,б), результаты которых представлены на рисунках 2,б и 2с; *d*, *e* – определение расчетных токов по формулам (9) и (8) с использованием наибольших значений z_{1M} , z_{0M} , функций $z_{1(t)}$ и $z_{0(t)}$; *f* – выводятся результаты моделирования.

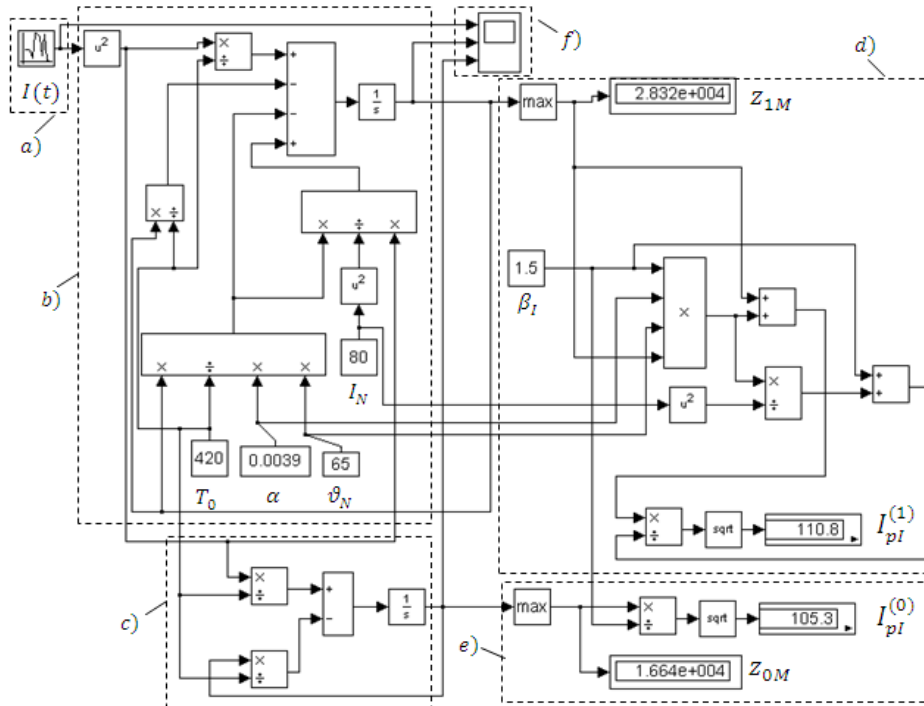


Рис. 2. Структурная схема модели, описывающей перегрев проводника относительно температуры окружающей среды

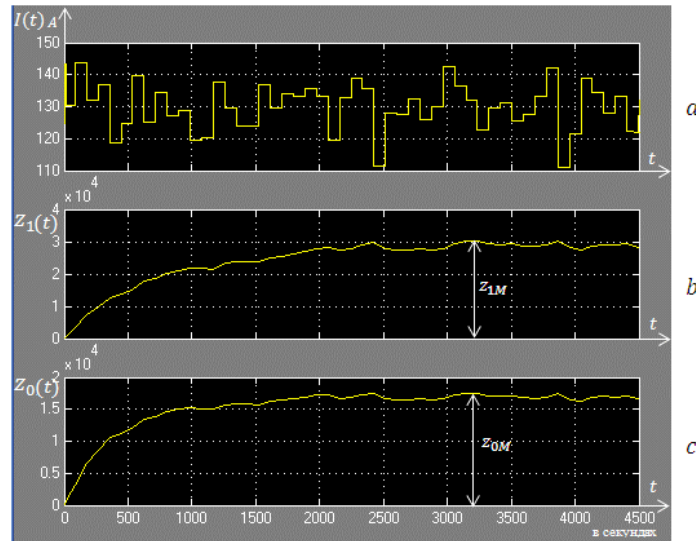


Рис. 3. Графики изменения во времени функций: $I(t)$ – тока нагрузки; $z_1(t)$ – интеграла дифференциального уравнения (7,а); $z_0(t)$ – интеграла дифференциального уравнения (7,б)

В качестве иллюстрации (рис. 3) показаны две интегральные кривые (рис. 3б, с) уравнений нагрева (7,а) и (7,б) для открыто проложенных проводов, полученные с использованием компьютерной модели (рис. 2), описывающей перегрев проводника относительно температуры окружающей среды, для показанного на том же рисунке смоделированного графика нагрузки $I(t)$.

Найденные в процессе моделирования значения $z_{0M} = 1,664 \cdot 10^4$ и $z_{1M} = 2,832 \cdot 10^4$ (рис. 3 б, с), привели к следующим значениям: $I_{pl}^{(0)} = 105,3 \text{ а}$; $I_{pl}^{(1)} = 110,8 \text{ а}$; при $\alpha = 0,0039$ и $\vartheta_N = 65$ для $\beta_1 = 1,5$.

Для оценки точности результатов моделирования по определению расчетных токов I_p с использованием выше описанной модели перегрева проводника относительно температуры окружающей среды, воспользуемся автоматизированным лабораторным стендом [11], схема которого показана на рис. 4, где Гр – градусник; Т1, Т2, Т3 – термопары; Пр1 и Пр2 – проводники; МП – магнитный пускатель; ЭП – электроприемник; РН – регулируемая нагрузка; ШД – шаговый двигатель.

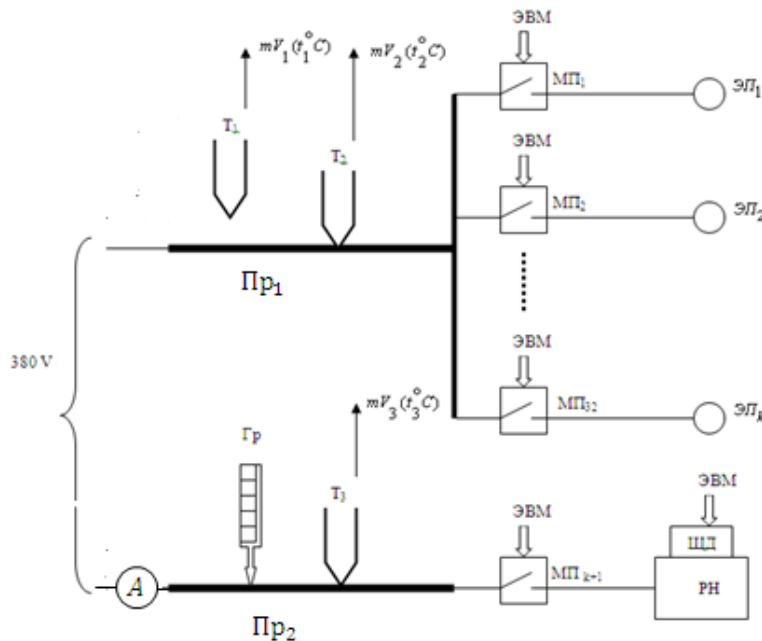


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для определения расчетного тока и исследования степени влияния изменяющегося во времени закона распределения нагрузки на значение расчетного тока

Подготовка экспериментальной установки к работе заключается в следующем: выбираем два провода Пр1, Пр2 одинаковой марки с равными сечениями, проложенных в одинаковых условиях. Сечения этих проводников выбираем в соответствии с значением расчетного тока I_p .

От первого провода получают питание N электроприемников с мощностями p_i ($i = 1, 2, \dots, N$). Ко второму проводу подключена нагрузка с регулируемой мощностью (рис. 4).

После запуска управляющей компьютерной программы алгоритм работы автоматизированного лабораторного стенда по определению расчетного тока состоит в следующем:

- 1) оператор вводит вероятностные законы функционирования каждого ЭП;
- 2) моделируется график работы каждого ЭП в соответствии с принятыми законами их работы;
- 3) управляющая компьютерная программа включает или отключает соответствующие ЭП в соответствии со смоделированным графиком. В результате, по проводу Пр1 протекает ток нагрузки со стохастическим характером изменения его значения;
- 4) через определенные интервалы времени измеряются и запоминаются в массиве $T(t)$ текущие значения температуры изоляции провода Пр2;

5) когда продолжительность работы электроприемников достигнет значения, равного трех или четырех кратного постоянного времени провода, в массиве $T(t)$ определяется максимальное значение температуры $t_{\max 0C}$ изоляции провода Пр1. Если значение $(t_{\max} - t_0)$ $0C$ равно значению длительно допустимой температуре ϑ_N перегрева провода в нормальном режиме, то путем пошагового увеличения нагрузки провода Пр2, доводим

значение перегрева провода Пр2 до значения, равного $(t_{\max} - t_0)$ 0С . Тогда по показанию амперметра определяем расчетный ток;

б) сопоставляя значения расчетных токов, полученные путем моделирования и эксперимента, делаем заключение о точности модели перегрева провода.

В заключение отметим: найденные в процессе моделирования значения $I_{PI}^{(0)} = 105,3\alpha$; $I_{PI}^{(1)} = 110,8\alpha$; при $\alpha = 0,0039$ и $\vartheta_N = 65$ для $\beta_1 = 1,5$, показали, что действительное значение расчетного тока $I_{рд}$ находится в пределах $105,3\alpha \leq I_{рд} \leq 110,8\alpha$. Этот факт подтвержден при оценке точности результатов моделирования по определению расчетных токов I_p с использованием автоматизированного лабораторного стенда.

Литература

1. Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хребтов Н.А. Актуальные вопросы моделирования развития электроэнергетических систем // Бюллетень центра фрактального моделирования // Научно-теоретический и прикладной журнал, 2011. С. 35–38.
2. Агеев С.П. Расчёт выбросов графиков нагрузки электрических сетей лесопильного цеха // Известия вузов, Электромеханика. 2013. № 5.
3. Кудрин Б.И. Расчёт электрических нагрузок потребителей: история, состояние, комплексный метод // Промышленная энергетика. 2015. № 5. С. 14–22.
4. Надтока И.И., Павлов А.В. Современное состояние и проблемы расчёта электрических нагрузок // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими. Материалы XII Международной научно-практической конференции, г. Новочеркасск, 24 июня 2013 г. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2013. С. 3–10
5. Павлов А.В. Ортогональное разложение графика электрической нагрузки на основе К-функций. // Моделирование. Теория, методы и средства. Материалы XIII Международной научно-практической конференции, г. Новочеркасск, 27 февраля 2013 г. 2013. С. 106–110.
6. Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. К.: Наукова думка, 1984. 271 с.
7. D.P. Chassin, J.M. Malard, C. Posse, A. Gangopadhyaya, N. Lu, S. Katipamula, J.V. Mallow. “Modeling Power Systems as Complex Adaptive Systems”. Loyola University, Chicago, IL., December 2004 151 p.
8. Ермаков В.Ф., Балыкин Е.С., Гудзовская В.А., Еволенко Н.А., Коваленко А.Н. Математическая модель процесса изменения температуры силового трансформатора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 2. С. 43–45.
9. Ермаков В.Ф., Гудзовская В.А., Балыкин Е.С., Зайцева И.В. Математическая модель процесса изменения температуры нагрева проводника // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 2. С. 42–43.
10. Надтока И.И., Павлов А.В. Анализ характеристик графиков электрических нагрузок многоквартирных жилых домов // IV международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодёжи», г. Новочеркасск, 14–18 октября 2013 г. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2013. С. 186–190.
11. Арфан А.Х., Сатаркулов К.А. Компьютерное управление экспериментом в системах электроснабжения промышленных предприятий // Наука, новые технологии и инновации. 2006. № 1. С. 50–54.
12. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С.Д. Волобринский, Г.М. Каялов, П.Н. Клейн, Б.С. Мешель. Л.: Энергия, 1971. 264 с.
13. Яблочников А.М., Байбагысова Д.Ж., Кадиева А.К., Сатаркулов К.А. Моделирование процесса нагрева и определение расчетной нагрузки проводника в среде simrowersystems и simulink // Известия КГТУ им. И. Раззакова. № 1 (41), часть I. Токмок: Изд. центр «Техник», 2017. 230 с.

Авторы публикации

Байбагысова Динара Жанузаковна – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика» филиала имени академика Х.А. Рахматулина в городе Токмок Кыргызского государственного технического университета имени И. Раззакова, г. Токмок, Кыргызская республика.

Кадиева Аида Кайыпбергеновна – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика» филиала имени академика Х.А. Рахматулина в городе Токмок Кыргызского государственного технического университета имени И. Раззакова, г. Токмок, Кыргызская республика.

Кадыров Чолпонбек Аманович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и общей электротехники» Кыргызского государственного технического университета имени И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызская республика.

Узагалиев Замирбек Асранкулович – начальник расчетного сектора РЗА ОАО «Северэлектро», г. Бишкек, Кыргызская республика.

References

1. Kochergin S.V., Kobelev A.V., Khrebtov N.A. Aktual'nye voprosy modelirovaniya razvitiya elektroenergeticheskikh sistem // Byulleten' tsentra fraktal'nogo modelirovaniya // Nauchno-teoreticheskii i prikladnoi zhurnal, 2011, S. 35–38.
2. Ageev S.P. Raschet vybrosov grafikov nagruzki elektricheskikh setei lesopil'nogo tsekha // Izv. vuzov, Elektromekhanika. 2013. № 5.
3. Kudrin B.I. Raschet elektricheskikh nagruzok potrebiteli: istoriya, sostoyanie, kompleksnyi metod // Promyshlennaya energetika. 2015. № 5. S. 14–22.
4. Nadtoka I.I., Pavlov A.V. Sovremennoe sostoyanie i problemy rascheta elektricheskikh nagruzok // Sovremennye energeticheskie sistemy i komplekсы i upravlenie imi. Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Novocherkassk, 24 iyunya 2013 g. / Yuzh.-Ros. gos. tekhn. un-t (NPI). Novocherkassk: YuRGU (NPI), 2013, S. 3–10
5. Pavlov A.V. Ortogonal'noe razlozhenie grafika elektricheskoi nagruzki na osnove K-funktsii. // Modelirovanie. Teoriya, metody i sredstva. Materialy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Novocherkassk, 27 fevralya 2013 g. / Yuzh.-Ros. gos. tekhn. un-t (NPI). Novocherkassk: YuRGU (NPI). 2013. S. 106–110.
6. Shidlovskii A.K., Kurennyi E.G. Vvedenie v statisticheskuyu dinamiku sistem elektrosnabzheniya. K.: Naukova dumka. 1984. 271 s.
7. D.P. Chassin, J.M. Malard, C. Posse, A. Gangopadhyaya, N. Lu, S. Katipamula, J.V. Mallow. “Modeling Power Systems as Complex Adaptive Systems”. Loyola University, Chicago, IL, December 2004 151 p.
8. Ermakov V.F., Balykin E.S., Gudzovskaya V.A., Evolenko N.A., Kovalenko A.N. Matematicheskaya model' protsessa izmeneniya temperatury silovogo transformatora // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. 2012. № 2. S. 43–45.
9. Ermakov V.F., Gudzovskaya V.A., Balykin E.S., Zaitseva I.V. Matematicheskaya model' protsessa izmeneniya temperatury nagreva provodnika // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. 2012. № 2. S. 42–43.
10. Nadtoka I.I., Pavlov A.V. Analiz kharakteristik grafikov elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov // IV mezhdunarodnuyu nauchno-tekhnicheskuyu konferentsiyu «Elektroenergetika glazami molodezhi», g. Novocherkassk, 14–18 oktyabrya 2013 g. / Yuzh.-Ros. gos. politekhn. un-t (NPI). Novocherkassk: YuRGU (NPI), 2013, S. 186–190.
11. Arfan A.Kh., Satarkulov K.A. Komp'yuternoe upravlenie eksperimentom v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii / Nauka, novye tekhnologii i innovatsii. 2006. № 1. S. 50–54.

12. Elektrycheskie nagruzki promyshlennykh predpriyatii / S.D. Volobrinskii, G.M. Kayalov, P.N. Klein, B.S. Meshel'. L.: Energiya, 1971. 264 s.

13. Yablochnikov A.M., Baibagysova D.Zh., Kadieva A.K., Satarkulov K.A. Modelirovanie protsessa nagreva i opredelenie raschetnoi nagruzki provodnika v srede simrowersystems i simulink // Izvestiya KG TU im. I. Razzakova № 1 (41) chast' I. Tokmok: Izd. tsentr «Teknik». 2017. 230 s.

Authors of the publication

Dinara J. Baibagysova - senior lecture, Department “Electroenergetics”, The branch named after academician H. A. Rakhmatulina in Tokmok of the Kyrgyz state technical University named after I. Razzakov.

Aida K. Kadieva - senior lecture, Department “Electroenergetics”, The branch named after academician H. A. Rakhmatulina in Tokmok of the Kyrgyz state technical University named after I. Razzakov.

Cholponbek A. Kadyrov – cand. sci. (techn.), assistant professor, Department “Theoretical foundations of electrical engineering and general electrical engineering”, the Kyrgyz state technical University named after I. Razzakov.

Zamirbek A. Uzagaliev – head of the estimated sector of relay protection and automation of Open joint-stock company "Severelektro".

Поступила в редакцию

14 июня 2017 года.

УДК 621.313.333

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ДЕБАЛАНСНОГО ВИБРОДВИГАТЕЛЯ

В.Н. Дмитриев, А.Л. Кислицын, Д.И. Дунаев

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия
dunaeff.dima2015@yandex.ru

Резюме: Рассматривается возможность торможения асинхронного дебалансного вибродвигателя путем конденсаторного противовключения. Приводятся результаты математического моделирования режимов выбега и торможения путем конденсаторного противовключения асинхронного вибродвигателя.

Ключевые слова: вибрационные машины, дебалансный асинхронный вибродвигатель, резонанс, торможение, конденсаторное противовключение.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-82-88

RESEARCH OF BRAKING MODES OF ASYNCHRONOUS VIBRATION MOTOR DEBELYANOVO

V.N. Dmitriev, A.L. Kislitsyn, D.I. Dunaev

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
dunaeff.dima2015@yandex.ru

Abstract: The possibility of braking the asynchronous unbalanced vibration motor through the capacitor of the opposition. The results of mathematical modeling modes, coasting and braking by condensing opposition asynchronous vibration motor.

Keywords: vibratory machines, unbalanced asynchronous vibration motor, resonance, inhibition, opposition condenser.

В настоящее время широкое применение на практике получили вибрационные машины и установки на базе дебалансных асинхронных вибродвигателей (АДВД), работающих в зарезонансной зоне частотной характеристики (вибростенды, сейсмоиспытательные установки, виброплощадки и т.д.) [1]. В связи с этим интерес к изучению процессов в вибрационных системах прослеживается как у отечественных, так и у зарубежных исследователей [2–4]. Установлено, что одним из существенных недостатков вибрационных зарезонансных машин является период остановки. Как правило, на практике для остановки АДВД до настоящего времени часто применяют торможение выбегом, в течение которого резонансные амплитуды могут в несколько раз превосходить амплитуды колебаний системы в установившемся режиме, это может привести к опасному росту напряжений в деталях и выходу из строя элементов электропривода [5–7]. Решением данной проблемы занимались многие ученые, что привело к разработке различных методов уменьшения колебаний вибрационных машин зарезонансного типа, таких как использование вибровозбудителей с автоматически или вручную регулируемым

статическим моментом дебалансов, применение управляемых динамических гасителей колебаний [1] и др. В работах [6–8] исследуется конденсаторное торможение АДВД вибрационных машин. Устройства конденсаторного торможения позволяют, наряду с торможением АДВД, использовать конденсаторы для повышения коэффициента мощности сети в рабочем режиме вибрационного привода. Однако диапазон действия конденсаторного торможения весьма ограничен и может не совпадать с зоной резонанса [6]. Таким образом, вопрос ускоренного прохождения резонансной зоны вибрационной машиной при торможении является актуальным и требует дальнейших исследований.

В настоящей работе рассматривается способ торможения зарезонансных вибрационных машин путем перевода АДВД из рабочего трехфазного режима с компенсацией реактивной мощности в режим конденсаторного противовключения.

Рассмотрим процессы торможения АДВД на примере динамической одномассовой вибрационной системы направленных колебаний с двумя вибродвигателями, показанной на рис. 1.

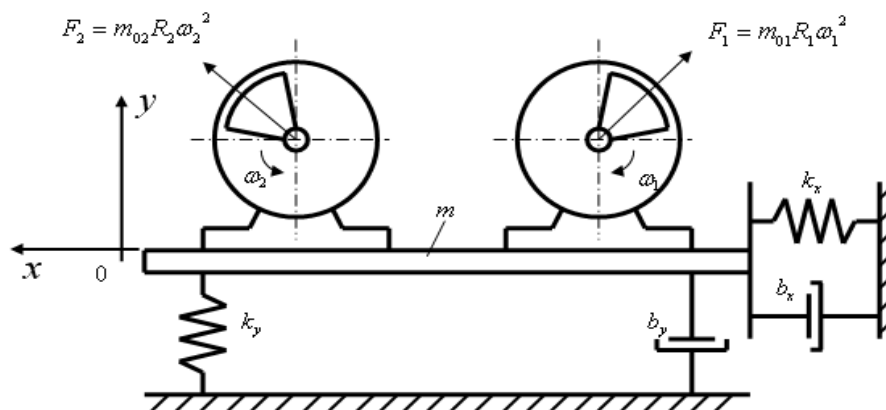


Рис. 1. Одномассовая вибрационная система направленных колебаний

Уравнения движения представленной вибрационной системы имеют вид [6; 9]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b_y \frac{dy}{dt} + k_y y = \sum_{i=1}^2 m_{0i} R_i \omega_i^2 \cos \omega_i t; \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b_x \frac{dx}{dt} + k_x x = \sum_{i=1}^2 m_{0i} R_i \omega_i^2 \sin \omega_i t; \quad (2)$$

$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = M_{\text{ЭМ}i} - M_{\text{ВИБ}i} - m_{0i} R_i g \sin \omega_i t - M_{\text{МЭХ}i}, \quad (3)$$

где m – масса виброплатформы с грузом; y и x – смещение виброплатформы по осям Y и X ; b_y и b_x – коэффициенты сопротивления системы по осям Y и X ; k_y и k_x – жесткости упругих связей по осям Y и X ; m_{0i} – масса i -го дебаланса; R_i – эксцентриситет i -го дебаланса; g – ускорение свободного падения; J_i – приведенный момент инерции i -го электродвигателя; $M_{\text{ЭМ}i}$ – электромагнитный момент на валу i -го электродвигателя; $M_{\text{МЭХ}i}$ – момент сопротивления на валу i -го электродвигателя, обусловленный механическими потерями; $M_{\text{ВИБ}i}$ – вибрационный момент на валу i -го электродвигателя; ω_i – скорость вращения вала i -го электродвигателя.

Уравнения (1) и (2) описывают движение виброплатформы согласно второму закону Ньютона в проекциях на оси X и Y соответственно, а уравнение (3) – равновесие моментов на валу i -го двигателя соответственно.

Вибрационный момент i -го вибродвигателя имеет две составляющие:

$M_{\text{ВИБРiY}} = F_{Xi} \cdot y$ – составляющая, обусловленная наличием смещения системы по оси Y и проекции центробежной силы i -го АДВД на оси X , где F_{Xi} определяется по формуле

$$F_{Xi} = m_{0i} R_i \omega_i^2 \sin \omega_i t.$$

$M_{\text{ВИБРiX}} = F_{Yi} \cdot x$ – составляющая, обусловленная наличием смещения системы по оси X и проекции центробежной силы i -го АДВД на оси Y , где F_{Yi} определяется по формуле

$$F_{Yi} = m_{0i} R_i \omega_i^2 \cos \omega_i t.$$

Результирующее значение вибрационного момента, приложенного к валу i -го АДВД, определяется формулой

$$M_{\text{ВИБРi}} = F_{Xi} \cdot y + F_{Yi} \cdot x.$$

Электромагнитные процессы в каждом АДВД описываются по выражениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ u_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}; \\ 0 = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ 0 = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ 0 = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{array} \right. \quad 4)$$

где u_A, u_B, u_C – значения фазных напряжений статора, в процессе торможения соответствующие напряжения равны нулю; $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$ – активные сопротивления обмоток статора и приведенные активные сопротивления обмоток ротора; $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ – фазные токи статора и ротора; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c$ – потокосцепления статорных и роторных обмоток.

Потокосцепление АДВД определяется выражением в матричной форме:

$$[\psi] = [M] \times [i],$$

где $[\psi] = [\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c]$ – матрица-столбец потокосцеплений; $[i] = [i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c]$ – матрица-столбец токов; $[M]$ – матрица индуктивностей.

Уравнение электромагнитного момента с учетом вышесказанного:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} p M [(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)],$$

где M – взаимная индуктивность; p – число пар полюсов АДВД.

Рассматривается вариант одноключевой схемы реверса асинхронного двигателя с конденсаторно-тиристорным коммутатором, показанная на рис. 2 [10].

Для пуска электродвигателя M включается трехфазный выключатель QF , и электродвигатель M работает в обычном трехфазном режиме. Коммутационные элементы (симисторы) $T1$ и $T2$ открыты, конденсаторы $C1, C2, C3$ подключены параллельно фазам сети и обеспечивают компенсацию реактивной мощности.

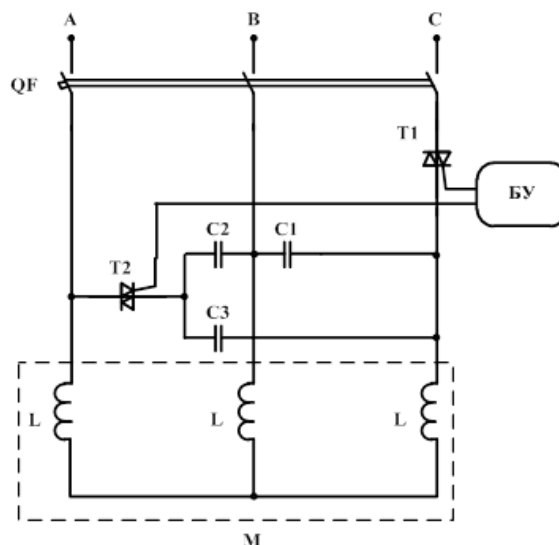


Рис. 2. Одноключевая схема реверса АДВД

При команде с блока управления (БУ) на торможение, симисторы $T1$ и $T2$ запираются и двигатель M переходит в режим противобращения, в котором фазные обмотки L фазы A и B подключены через конденсаторы $C2$ и $C3$ на линейное напряжение U_{AB} , а третья фазная обмотка L вместе с конденсаторами $C1$, $C2$, $C3$ подключена к той из фаз сети, напряжение которой опережает на 120° напряжение фазы, к которой подключен симистор $T1$ (фаза C). Наличие конденсаторов $C1$, $C2$, $C3$ (при правильно выбранной величине ёмкости) меняет фазу тока в обмотке L фазы C , что меняет порядок чередования фаз обмоток и обеспечивает режим противобращения АДВД.

При остановке АДВД отключается от сети.

Величина эквивалентной ёмкости трех конденсаторов в режиме противобращения для схемы «звезда» рассчитывается исходя из обеспечения заданного момента противобращения по формуле

$$C_k = 2780 \frac{I_{пр}}{U_n},$$

где $I_{пр}$ – ток противобращения; U_n – номинальное напряжение.

Для обеспечения симметрии напряжений в трехфазном режиме ёмкости конденсаторов выбираются равными по величине, тогда, исходя из заданной эквивалентной ёмкости и схемы соединения конденсаторов, ёмкость каждого конденсатора определится по формуле

$$C = \frac{2}{3} C_k.$$

В конденсаторном режиме противобращения систему уравнений (4) необходимо дополнить соотношением

$$U_C = U_B - \frac{1}{C_k} \int i_C dt,$$

где C_k – ёмкость фазосдвигающего конденсатора.

Представленная система нелинейных дифференциальных уравнений эффективно решается с помощью вычислительной техники с использованием численных методов интегрирования и дифференцирования. Для этих целей была создана математическая

модель рассматриваемой вибрационной системы и асинхронного дебалансного электродвигателя с конденсаторами в программной среде МВТУ 3.7, проведены исследования тормозных режимов работы машины.

Основные параметры вибростенда: $m=172$ кг; $b_y=800$ Н/м; $b_x=500$ Н/м; $k_y=3000000$ кг·м/с²; $k_x=390000$ кг·м/с². Тип вибродвигателя ИВ – 105–2,2 на базе АДВД с параметрами: $P_H=2,2$ кВт; $n_1=3000$ об/мин; $R_1=3,13$ Ом; $L_1=0,015$ Гн; $R_2=5,7$ Ом; $L_2=0,010$ Гн; $L_m=0,51$ Гн; $J_d=0,0034$ кг·м²; $m_0=3,7$ кг; $r_0=0,06$ м. Емкость конденсаторов: $C1=C2=C3=390$ мкФ.

На рис. 3 показаны расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД, электромагнитного момента и амплитуды колебаний по оси Y при выбеге. Из осциллограмм можно заключить, что изменение скорости от номинального значения до нуля происходит за время 3,75 с, при этом амплитуда колебаний области резонансной частоты системы ($\omega_{рез}=118,5$ рад/с), достигает 34 мм.

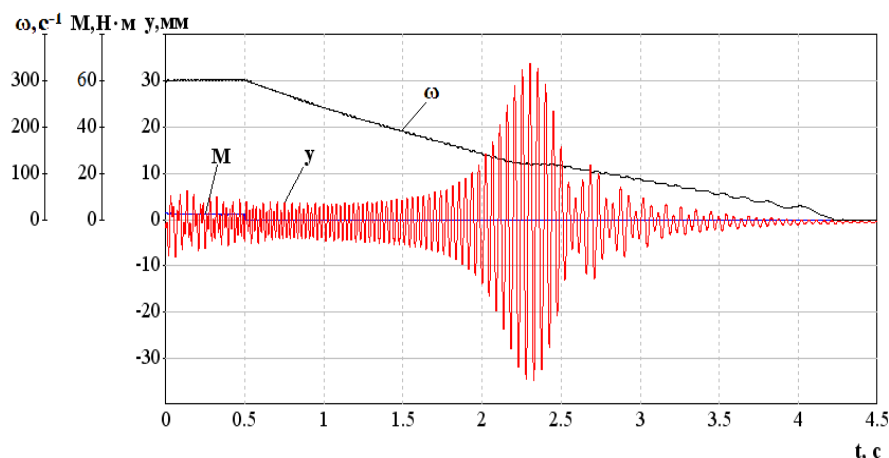


Рис. 3. Частота вращения АДВД, электромагнитный момент и смещение системы по оси Y при выбеге

На рис. 4 представлены расчетные осциллограммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний по оси Y при торможении конденсаторным противовключением. Определено, что оптимальный тормозной момент, для данной резонансной частоты вибрационной системы, достигается при минимальной эквивалентной емкости $C3 = 260$ мкФ.

В ходе исследований было установлено, что использование конденсаторного противовключения АДВД ведет к ускоренному прохождению механической системы зоны резонанса и приводит к уменьшению резонансных амплитуд колебаний вибрационной системы по сравнению с наблюдаемым в процессе торможения выбегом.

Время торможения уменьшается более чем в три раза, а амплитуда колебаний в резонансной зоне уменьшается в 1,6 раза. Это позволяет существенно повысить надежность зарезонансных вибрационных машин.

Опытный образец рассматриваемого вибростенда был внедрен в 2017 году при развитии экспериментально-испытательной базы ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Результаты промышленных испытаний и успешный опыт эксплуатации подтвердили теоретические и расчетные данные.

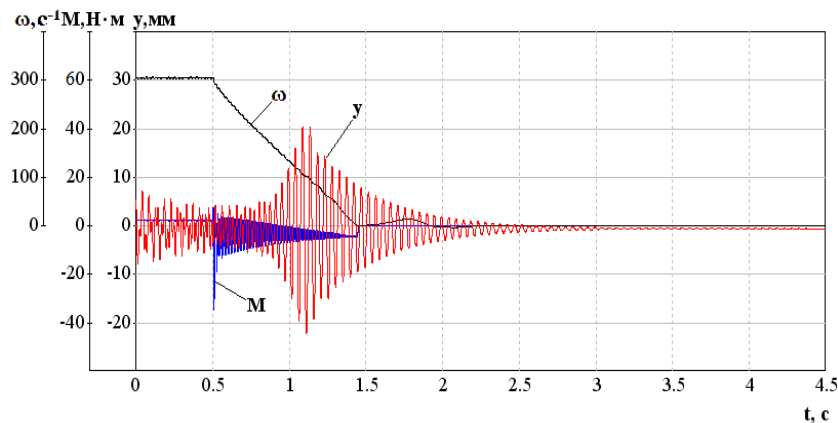


Рис. 4. Частота вращения АДВД, электромагнитный момент и смещение системы по оси Y при конденсаторном торможении

Выводы

1. Конденсаторное торможение АДВД позволяет существенно сократить время торможения и максимальные резонансные амплитуды колебаний машины, исключив, тем самым, неблагоприятные режимы ее работы.
2. Представленная математическая модель позволяет с необходимой точностью проводить исследования переходных установившихся процессов электропривода при различных параметрах АД, вибрационной системы и тормозных конденсаторов.

Литература

1. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб: ИД «Руда и Металлы», 2013. 640 с.
2. Jnoue J. The self-synchronization of mechanical vibrators of the resonance type vibrating machinery with multidegree of freedom / J. Jnoue, Y. Araki, M. Hirakawa. «Dyn. Multibody Syst. Symp., Munich, 1977», Berlin e.a., 1978. P. 75–86.
3. Алимхаджаев К.Т. Взаимное влияние электромагнитных и механических переходных процессов в асинхронных вибродвигателях // Электротехника. 2003. № 8. С. 20–24.
4. Шестаков В.М., Белокузов Е.В., Епишкин А.Е. Синтез законов управления режимами работы автоматизированных вибрационных установок // Электричество. 2013. №11. С. 31–35.
5. Кракиновский Л.М. Определение максимальной амплитуды колебаний при выбеге вибромашин // Вибрационная техника: материалы семинара. М.: МДНТП, 1971. № 2. С. 129–136.
6. Дмитриев В.Н., Гаврилов Е.Н. Переходные процессы резонансных вибрационных машин // Электротехнические комплексы и системы управления. 2011. № 4. С. 52–55.
7. Гаврилов Е.Н. Динамические процессы резонансных вибрационных машин // Вестник Казанского технологического университета. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. Т. 16. № 12. С. 87–90.
8. Гаврилов Е.Н. Исследование тормозных режимов резонансных вибрационных транспортирующих машин // Вестник Казанского технологического университета. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. Т. 16, № 12. С. 84–87.
9. Гаврилов Е.Н. Математическое описание одномассовой вибрационной транспортирующей машины // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 1. С. 339–343.
10. Дмитриев В.Н., Кислицын А.Л. Судовые электромеханические устройства ввода-вывода информации. М.: Энергоатомиздат, 2006. 253 с.

Авторы публикации

Дмитриев Владимир Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и АПУ» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ).

Кислицын Анатолий Леонидович – канд. техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и АПУ» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ).

Дунаев Дмитрий Иванович – аспирант кафедры «Электропривод и АПУ» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ).

References

1. Blekhman I.I. Teoriya vibratsionnykh protsessov i ustroystv. Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika. SPb: ID «Ruda i Metally», 2013. 640 s.
2. Jnoe J. The self-synchronization of mechanical vibrators of the resonance type vibrating machinery with multidegree of freedom / J. Jnoe, Y. Araki, M. Hirakawa. «Dyn. Multibody Syst. Symp., Munich, 1977», Berlin e.a., 1978. P. 75–86.
3. Alimkhadzaev K.T. Vzaimnoe vliyaniye elektromagnitnykh i mekhanicheskikh perekhodnykh protsessov v asinkhronnykh vibrodvigatelyakh // Elektrotekhnika. 2003. №8. S. 20–24.
4. Shestakov V.M., Belokuzov E.V., Epishkin A.E. Sintez zakonov upravleniya rezhimami raboty avtomatizirovannykh vibratsionnykh ustanovok // Elektrichestvo. 2013. №11. S. 31–35.
5. Krakinovskii L.M. Opredelenie maksimal'noi amplitudy kolebaniy pri vybege vibromashin // Vibratsionnaya tekhnika: materialy seminara. M.: MDNTP, 1971. № 2. S. 129–136.
6. Dmitriev V.N., Gavrilov E.N. Perekhodnye protsessy zarezonansnykh vibratsionnykh mashin // Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya. 2011. № 4. S. 52–55.
7. Gavrilov E.N. Dinamicheskie protsessy zarezonansnykh vibratsionnykh mashin // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. Kazan': Izd-vo KNITU. 2013. T. 16. № 12. S. 87–90.
8. Gavrilov E.N. Issledovanie tormoznykh rezhimov zarezonansnykh vibratsionnykh transportiruyushchikh mashin // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. Kazan': Izd-vo KNITU. 2013. T. 16. № 12. S. 84–87.
9. Gavrilov E.N. Matematicheskoe opisanie odnomassovoi vibratsionnoi transportiruyushchei mashiny // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. T. 18. № 1. S. 339–343.
10. Dmitriev V.N., Kislitsyn A.L. Sudovye elektromekhanicheskie ustroystva vvoda – vyvoda informatsii. M.: Energoatomizdat, 2006. 253 s.

Authors of the publication

Vladimir N. Dmitriev – dr. tech. sciences, professor, Department of electrical and APU, Ulyanovsk state technical University.

Anatoly L. Kislitsyn – cand. tech. sciences, professor, Department of electrical and APU, Ulyanovsk state technical University.

Dmitriy I. Dunaev – postgraduate student, Department of electrical and APU, Ulyanovsk state technical University.

Поступила в редакцию

22 ноября 2017 года.

МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛИНИИ ОБРЕЗИНИВАНИЯ КОРДА

С.Н. Сидоров¹, Н.И. Горбачевский², Е.Н. Гаврилов²

¹Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

²Нижекамский химико-технологический институт
филиал «Казанский национальный исследовательский университет»
г. Нижнекамск, Россия

Резюме: В работе представлены результаты исследования в области создания энергетически эффективных многодвигательных приводов, с помощью обратимых преобразователей частоты, способных уменьшить суммарную установленную мощность многодвигательного привода кордной линии. Обоснован выбор наиболее целесообразной конструкции, основывающейся на использовании в схеме инвертора тока запираемых вентилей типа GTO или IGBT и полярных демпфирующих конденсаторов в составе устройств защиты от возможных повышений коммутационных перенапряжений.

Ключевые слова: электротехнические системы, электропривод линии обрезаживания корда, обратимые преобразователи частоты.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-89-98

MULTIVULATED FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE OF CORD WRAPPING LINE

S.N. Sidorov¹, N.I. Gorbachevsky², E.N. Gavrilov²

¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

²Nizhnekamsk Chemical-Technological Institute, Nizhnekamsk, Russia

Abstract: The urgency of the work is due to the need to develop a multi-motor frequency-controlled electric drive for cord clipping lines. The study of the construction of energy-efficient multi-motor drives, with the help of reversible frequency converters, which can reduce the total installed power of the multi-motor drive of the cord line. Justification of the choice of the most suitable design, based on the use in the inverter current circuit of lockable gates such as GTO or IGBT and polar damping capacitors as part of protection against possible increases in switching overvoltage.

Keywords: Electrical systems, the electric drive of a line of rubberizing of a cord, reversible converters of frequency.

В настоящее время наметилась устойчивая тенденция опережающего развития химических отраслей в Российской промышленности. Наращивание выпуска востребованной продукции реализуется как введением новых мощностей, так и реконструкцией и модернизацией действующих установок.

Новые требования обязывают выполнять установленные «Международной электротехнической комиссией» (МЭК) стандарты и нормативы в отношении

электромагнитной совместимости электроприводов с питающей сетью. Приоритетными признаются решения, основывающиеся на принципах активного энергетического взаимодействия преобразователя с питающей сетью. Переход к активному электропотреблению превращает преобразователь в потребитель полезной (активной) мощности сетевого входа, а при необходимости повышения общесетевого коэффициента мощности – в компенсатор пассивных составляющих этой мощности, генерируемых другими нагрузками [1–3]. На сегодняшний день электроприводы линии обрешивания корда не отвечают указанным требованиям [4–10]. Как правило, их эксплуатация сопряжена с необходимостью компенсации значительного объёма пассивной (реактивной) мощности, а также мощности генерируемых в сеть высших гармоник тока. Представленный материал посвящён поиску более приемлемого решения. Дается сравнительный анализ нескольких вариантов построения многодвигательного электропривода на основе обратимых преобразователей частоты (ОПЧ).

Представляющие наибольший интерес варианты частотно-регулируемых приводов на основе двухзвенных ОПЧ показаны на рис. 1.

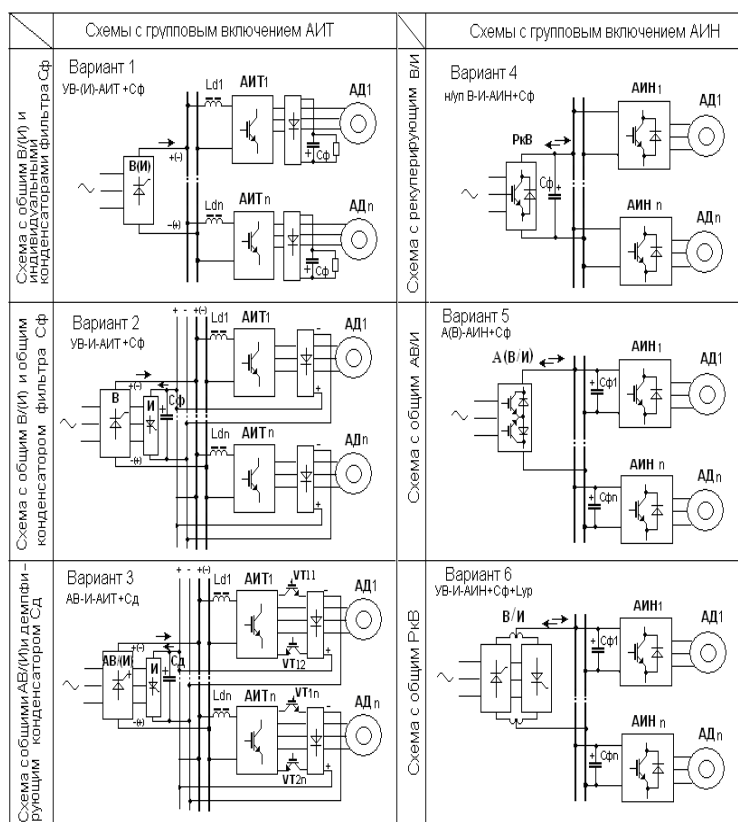


Рис. 1. Варианты исполнения многодвигательного электропривода

При составлении расчётной схемы замещения ограничимся рассмотрением 2-х двигательного привода, режимы работы которого определяются соотношением сетевого напряжения E_1 и напряжения на шинах постоянного тока E_d как функции угла управления тиристорами α блока В/И – с одной стороны и приведённой эдс вращения двигателя E_{12} – с другой. Рассмотрение проведём с учётом эквивалентных сопротивлений сети r_1 , L_1 и обмоток статора АД r_2 , L_2 . Начальное представление об условиях выпрямительного и

инверторного режимов в тиристорном преобразователе даёт показанная на рис. 2 компьютерная модель однодвигательного привода, выполненного, согласно варианту 1, на основе автономного инвертора тока. Условием работы частотно-токовых электроприводов является задание не только величины, но и фазы тока на выходе АИТ. С этой целью АИТ выполняется на запираемых вентилях с односторонней проводимостью тока, попарная работа которых в составе мостовой схемы происходит с длительностью проводящего состояния каждого вентиля на периоде $\lambda=2\pi/3$. В этих условиях отсутствие обратных диодов и конденсаторного фильтра в звене знакопостоянного тока (ЗЗПТ) могут привести к значительным коммутационным перенапряжениям в моменты запираания вентилей. Одно из наиболее простых устройств защиты от перенапряжений работает по принципу вывода избыточной энергии коммутации в полярный конденсатор фильтра C_f , оснащённый параллельно подключенным разрядным резистором. Ввиду невозможности нахождения полярного конденсатора в ЗЗПТ со знакопеременным напряжением, его подключение, как показано на рис. 1, осуществляется посредством вспомогательного диодного моста параллельно статорным обмоткам двигателя АД. Достижаемое, благодаря ключам с односторонней проводимостью, постоянство знака тока $i_d(t)$ на входах АИТ делает возможным, как уже отмечалось, выполнение блока выпрямления/(инвертирования) В/(И) в виде однокомплектного преобразователя.

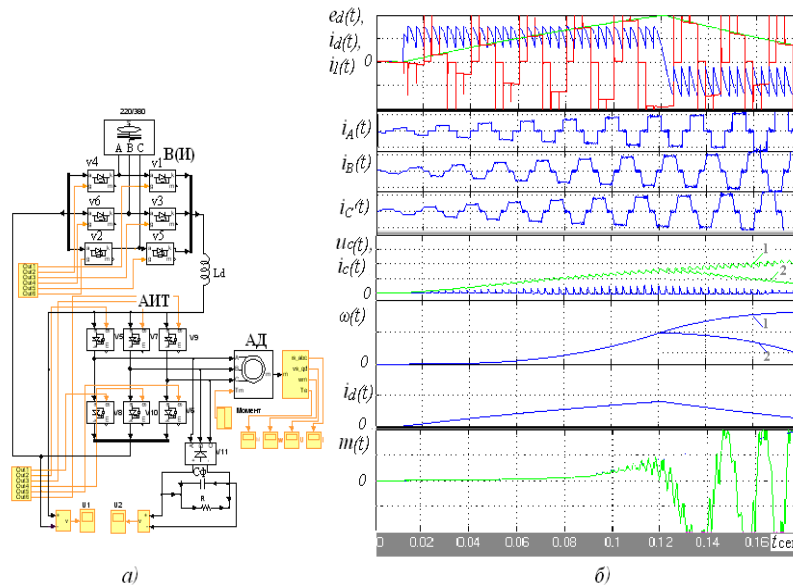


Рис. 2. Компьютерная модель однодвигательного привода с инвертором тока (а) и полученные с её помощью диаграммы выпрямительного, при $t \leq 0,12c$, $\alpha \leq \pi/2$, и инверторного, при $t \geq 0,12c$, $\alpha \geq \pi/2$ режимов (б)

Согласно варианту 2, элементной базой этого преобразователя могут служить однооперационные тиристоры [11]. Обозначенное скобками звено (И) присутствует в составе однокомплектного преобразователя в неявном виде, так как его функции обеспечиваются установкой угла управления тиристорами в диапазоне $\alpha \geq \pi/2$, в то время, как функции звена В требуют установки угла управления этими же тиристорами в диапазоне $\alpha \leq \pi/2$. Данное свойство подтверждают приведённые на рис. 2,б результаты компьютерного моделирования [12]. Полученная картина иллюстрирует перевод блока В/(И) в момент $t = 0,12c$ из выпрямительного режима в инверторный. Видно, что

произошедшее в данный момент изменение знака выпрямленного напряжения $e_d(t)$ способствует началу рекуперативного торможения. На это указывает снижение скорости вала $\omega \rightarrow 0$, сопровождающееся передачей накопленной энергии двигателя не только в конденсатор C_Φ , но и посредством звена (И) в питающую сеть. Процесс сопровождается снижением напряжения конденсатора $u_C(t)$ (кривая 2) и потребляемого тока на сетевом фазном входе $i_1(t)$. Происходящая на интервале торможения $t \geq 0,12c$ подпитка со стороны электрической машины объясняет поддержание токов статорных обмоток двигателя $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ в это время на некотором постоянном уровне.

Аналитическое описание однодвигательного привода предполагает получение результирующего вектора 3-х фазного синусоидального напряжения питания в комплексной форме записи:

$$\bar{E}_1 = (e_A(t)a^0 + e_B(t)a^1 + e_C(t)a^2) \cdot 2/3 = E_{1M} \exp(j\omega_1 t);$$

$$e_A(t) = E_{1M} \sin(\omega_1 t);$$

$$e_B(t) = E_{1M} \sin(\omega_1 t - 2\pi/3);$$

$$e_C(t) = E_{1M} \sin(\omega_1 t + 2\pi/3);$$

$$a^0 = 1; a^1 = \exp(j2\pi/3);$$

$$a^2 = \exp(j4\pi/3).$$

Аналогичное представление остальных напряжений и токов в схеме замещения рис. 3 превращает блоки В/(И) и АИТ в однофазную вентильную схему с эквивалентными параметрами сетевого входа $r_1, x_1, \bar{E}_1, \bar{E}_{12}$ и нагрузки $r_2, L_2, \bar{E}_2$ [3; 6; 14].

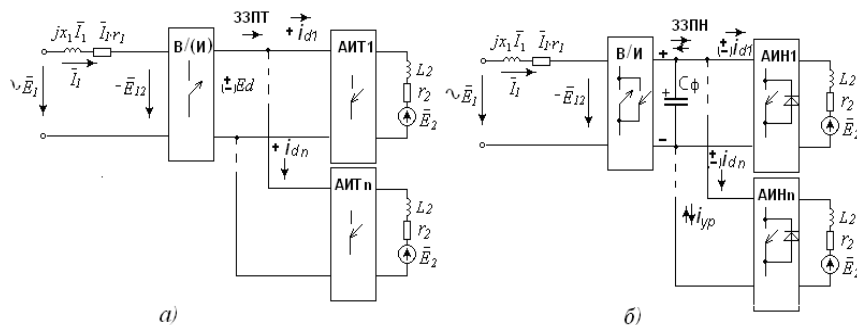


Рис. 3. Упрощенная схема замещения многодвигательного электропривода на основе инверторов тока АИТ1÷АИТn (а) и инверторов напряжения АИН1÷АИНn (б)

Тогда для рассмотрения энергетического взаимодействия ОПЧ с питающей сетью достаточно записать уравнение баланса установившихся напряжений в цепях сетевого входа полученной модели:

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_{12} + \bar{I}_1 r + j \bar{I}_1 x, \quad (1)$$

где $\bar{E}_{12} = \mu E_{12M} \cdot \exp(j\varphi_E)$ – вектор приведённой к сетевому входу основной гармоники противо-эдс вращения двигателя; $\bar{I}_1 = I_{1M} \exp(j\varphi_i)$ – вектор основной гармоники сетевого тока; $r = r_1 + r_2$; $x = x_1 + x_2$ – эквивалентные, приведённые к сетевому входу, активное и индуктивные сопротивления схемы замещения. Указанное приведение осуществляется исходя из баланса активной мощности сетевого входа и звена постоянного тока (ЗПТ) $\bar{E}_1 \bar{I}_1 3/2 = E_d I_d$. На плоскости вращающихся с частотой сети ω_1 ортогональных координат $[x; jy]$ уравнение (1) можно отобразить в виде неподвижной векторной диаграммы (рис. 4, а, б).

Совместим неизменный по модулю $E_{m1}=\text{const}$ и фазе $\varphi=0$ вектор сетевого напряжения с вещественной осью ОХ этой диаграммы.

Видим, что существование того или иного энергетического режима зависит от величины и взаимного расположения двух векторов, представляющих сетевое напряжение $\bar{E}_1$ и приведённую к сетевому входу ЭДС звена постоянного тока $\bar{E}_{12}$. Геометрическая разность указанных векторов, согласно уравнению (1), представляет вектор падения напряжения на суммарном эквивалентном сопротивлении схемы замещения $\bar{I}_1 z$.

Показанный на рис. 4 случай характеризует работу ОПЧ в режиме компенсированного преобразователя при отсутствии в составе мощности сетевого входа $S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$ реактивной составляющей $Q_1=0$. Видно, что данный режим существует благодаря отсутствию фазового сдвига тока относительно сетевого напряжения $\varphi_1=0$. Видно, что возникновению компенсированного режима при нулевых значениях угла управления тиристорами $\alpha=0$ в условиях подтормаживания привода $E_{12} \leq E_1$ может способствовать уменьшение реактивного сопротивления схемы замещения $x \rightarrow 0$ (см. рис. 4,б). И наоборот, при подкручивании двигателя со стороны нагрузки $E_{12} \geq E_1$ сохранения компенсированного режима при $\varphi_1=0$ можно добиться уменьшением активного сопротивления этой схемы $r \rightarrow 0$ (см. рис. 4,б).

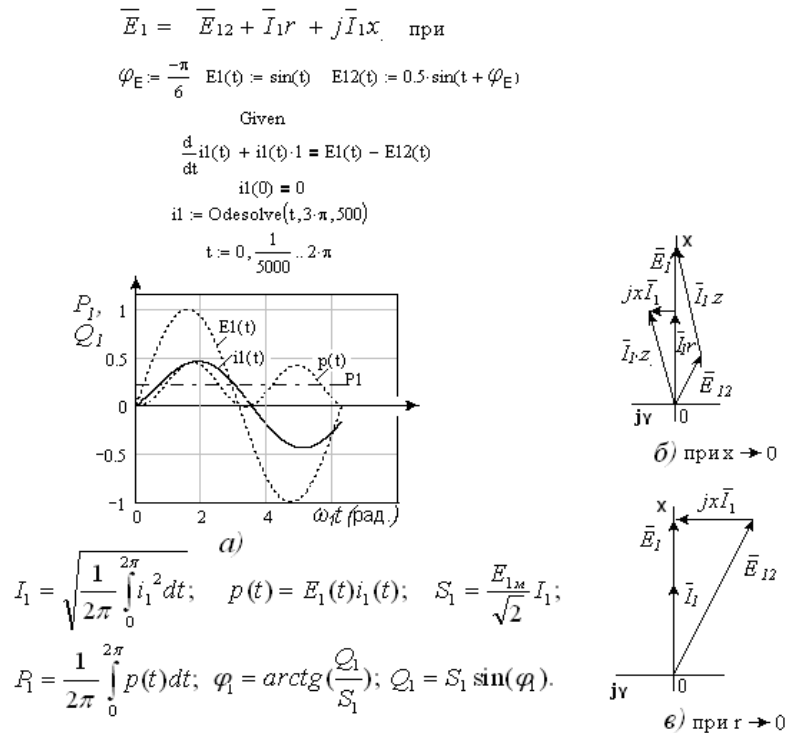


Рис. 4. Алгоритм получения векторной диаграммы ОПЧ с помощью программы *Matchad* (процедура *Given*): расчётные кривые мгновенных $E_1(t)$, $i_1(t)$, $p(t)$ и интегральных P_1, Q_1 координат при $\varphi_1=0$, $Q_1=0$ (а); векторные диаграммы для случаев $E_1 \geq E_{12}$ (б), $E_1 \leq E_{12}$ (в)

Известно, что фазовое регулирование напряжения на выходе тиристорного выпрямителя при $\alpha=\varphi_i \geq 0$ превращает блок В(И), а значит и весь электропривод, в потребитель «реактивной мощности сдвига» из питающей сети. Наглядным отображением энергетических

процессов в данном электроприводе может служить 2-х квадрантная энергетическая диаграмма. На рис. 5 показано, что осями указанного графика могут служить величины активной P_1 и реактивной Q_1 мощностей сетевого входа ОПЧ. При этом верхний квадрант иллюстрирует работу блока В/(И) в выпрямительном режиме с потреблением обеих составляющих мощности $P_1 \geq 0$, $Q_1 \geq 0$, в то время, как нижний квадрант помогает выяснить условия возникновения инверторного режима, протекающего при $P_1 \leq 0$, $Q_1 \geq 0$.

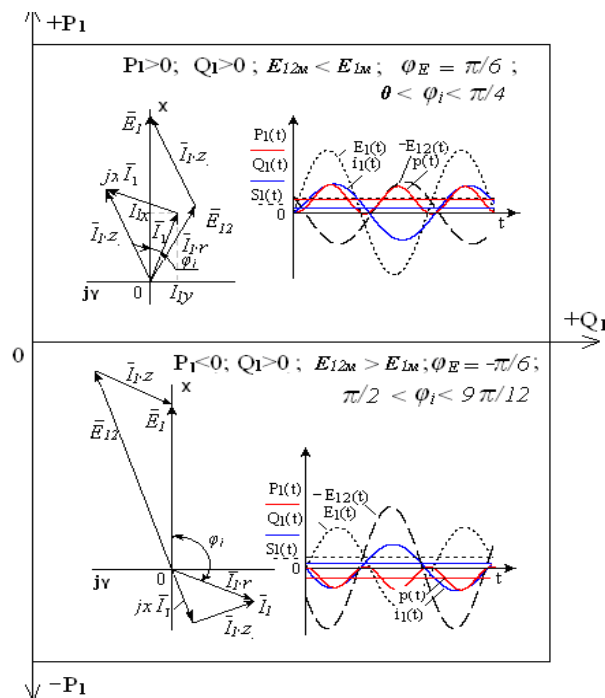


Рис. 5. Энергетическая диаграмма ОПЧ с однокомплетным тиристорным преобразователем В/(И) на сетевом входе

Как отмечалось, рассмотрение потоков электрической мощности в структуре многодвигательного электропривода должно учитывать наличие общих шин питания инверторов и появляющуюся в связи с этим возможность взаимного энергетического влияния приводов друг на друга. Признаком существующего энергетического режима в схеме ОПЧ служит знак активной мощности в среднем звене двухзвенной структуры. При определении этого знака следует учитывать степень проводимости ключей инвертора. Выполнение АИТ на однонаправленных ключах превращает указанную часть схемы в звено знакопостоянного тока. В противоположность данным схемам, выполнение АИН на ключах с двухсторонней проводимостью делает эту часть схемы звеном знакопостоянного напряжения (ЗЗПН). Рассмотрение условий энергетического взаимовлияния ОПЧ проведём с помощью схем замещения на рис. 3 в предположении синусоидальности сетевого напряжения. Наличие общего блока питания В/И позволяет считать величину и форму напряжения на входе всех инверторов одинаковой. В связи с этим основной причиной энергетического взаимовлияния приводов в многодвигательной структуре следует рассматривать уравнильный ток $i_{yp} = i_{dl} - i_{dn}$.

Из схемы ЗЗПН на рис. 3,б видно, что в схемах на основе АИН появление уравнильного тока возможно в случаях работы соседних приводов в разных энергетических режимах, причём его замыкание происходит по цепям, минуя конденсатор C_Φ . Положительной стороной данного явления следует рассматривать токовую

разгрузку конденсатора и, соответственно, уменьшение пульсаций напряжения в звене ЗЗПН. Подтверждение данного вывода получено с помощью компьютерной модели 2-х двигательного привода, выполненной по варианту 4 (рис. 1) на инверторах АИН1 и АИН2. При условии, что регулирование напряжения и частоты на выходах АИН ведётся широтно-импульсным способом, блок В может быть выполнен на неуправляемых вентилях (диодах), в то время, как блок (И) требует применения управляемых, а для устранения между В и блоком (И) токов междуфазного к.з. – полностью управляемых (запираемых) вентилях. Наличие в звене ЗЗПН этой схемы конденсаторного фильтра C_ϕ обеспечивает не только традиционные функции сглаживания напряжения и замыкания реактивного тока, но и запирающие диодов блока В, препятствующего развитию тока междуфазного к.з. на интервалах одновременной работы вентилях блоков (И) и В.

Программа испытаний модели включала запуск электропривода на холостом ходу с последующим последовательным переводом АД1 и АД2 в моменты $t=0,05$ с и $t=0,1$ с в режим рекуперативного торможения путём приложения к валу подкручивающего момента. Для сравнения торможение проведено при выключенном и включённом состояниих сетевого инвертора (И). Как видно из кривой рис. 6,б, перевод АД2 в момент $t=0,1$ с в генераторный режим, наряду с повышением уровня напряжения конденсатора, привёл к заметному уменьшению результирующего тока на входе инвертора АИН1 $i_{d1} = i_{d2} - i_{yp}$ см.

рис. 6,л. Повторение этого эксперимента при включённом инверторе (И) позволило стабилизировать напряжение конденсатора на меньшем уровне см. рис. 6,в.

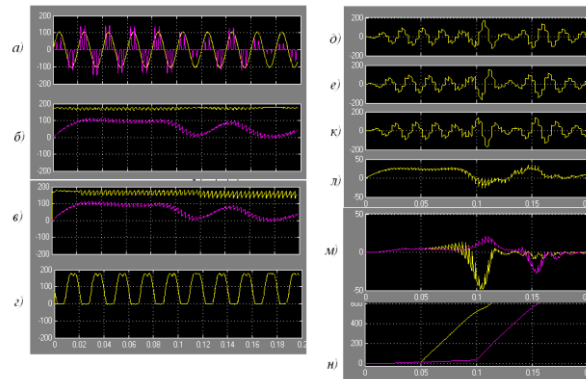


Рис. 6. Результаты моделирования электропривода по системе н/уп В–И–АИН -АД+ C_ϕ (вариант 4): а – фазное напряжение и ток сетевого входа; б – выпрямленное напряжение и ток в звене ЗЗПН на общем входе инверторов; в – напряжение на одном из ключей блока В/(И); д,е,ж – токи статорных обмоток АД1; з,и – кривые момента и скорости двигателей

В противоположность данным схемам, появление уравнивающего тока в схемах с инверторами тока, по причине односторонней проводимости ключей, оказывается невозможным. Тем не менее, говорить об энергетической автономности приводов в схеме варианта 1 (рис. 1) нельзя. Причиной взаимозависимости приводов в данной схеме является совмещение функций выпрямления и инвертирования в одном блоке В/(И), поэтому перевод этого блока во время торможения одного из приводов в инверторный режим повлечёт нежелательное изменение величины и знака напряжения питания на входах всех остальных приводов кордной линии. Таким образом, использование инверторного режима в схеме варианта 1 имеет смысл лишь в одном случае, а именно – при экстренном электрическом торможении и одновременном выключении всех приводов кордной линии. Тем не менее, удовлетворить требованию автономности приводов в схемах с АИТ можно, для чего необходимо разделить потоки потребляемой и возвращаемой мощностей приводов, работающих в разных энергетических режимах. Для этого каждый из приводов

предлагается оснастить индивидуальными цепями вывода энергии торможения в общий конденсатор фильтра C_Φ на входе единого для всей линии рекупирующего инвертора. Согласно варианту 2 (рис. 1) структурная схема многодвигательного электропривода с раздельными потоками мощностей, кроме шин потребляемой мощности, оснащается дополнительными шинами возвратной мощности. В отличие от первых, полярность напряжения на шинах обратной мощности, благодаря выпрямительным диодам, сохраняется неизменной, соответствующей проводящему состоянию тиристоров рекупирующего инвертора. Проверка данного решения проведена с помощью компьютерной модели 2-х двигательного привода с автономными инверторами АИТ1 и АИТ2. Так же, как и ранее, программа испытаний включала одновременный запуск электродвигателей АД1 и АД2 на холостом ходу с последующим переводом их в режим рекуперативного торможения. Этот перевод осуществлялся последовательным приложением к двигателям при $t=0,1$, $t=0,15$ с отрицательного момента нагрузки.

Как видно из рис. 7,м, возникающее подкручивание двигателей сопровождается дополнительным увеличением скорости и противо-э.д.с. вращения, однако, в зависимости от состояния рекупирующего инвертора (И), это может по-разному влиять на уровень напряжения конденсаторного фильтра C_Φ (рис. 7,з). Согласно варианту 2 обкладки этого конденсатора подключены в проводящем направлении к входным зажимам инвертора (И), образуя, тем самым, упомянутые шины возвратной мощности. С целью сравнения работа этого инвертора рассматривалась в закрытом при $\alpha \rightarrow \pi$ и открытом при $\alpha \rightarrow \pi/2$ состояниях. Как можно видеть из рис. 7,в, закрытие инвертора приводит к существенному росту напряжения конденсатора, являясь причиной недопустимого роста перенапряжений. В этих условиях ограничить рост перенапряжений можно лишь путём рассеивания избыточной энергии в разрядном резисторе. В противоположность этому, кривые напряжения и тока конденсатора C_Φ на рис. 7,з демонстрируют возможность решения задачи с помощью открытых для обратного потока мощности тиристоров инвертора (И). Видно, что появляющаяся возможность направить энергию торможения в питающую сеть ведёт к уменьшению уровня напряжения на обкладках конденсатора.

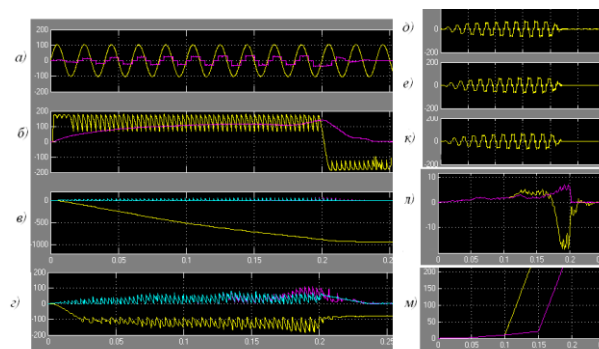


Рис. 7. Результаты моделирования электропривода по системе УВ-И-АИТ-АД+ C_Φ (вариант 2):
 а – фазное напряжение и ток сетевого входа; б – выпрямленное напряжение и ток в звене ЗЗПТ на общем входе инверторов; в, г – напряжение и ток конденсатора фильтра C_Φ в закрытом (в) и открытом (г) состояниях сетевого инвертора (И); д,е,ж – токи статорных обмоток АД;
 л, м – кривые момента и скорости двигателей

Главное достоинство этого варианта состоит в возможности изменять уровень установившегося напряжения конденсатора, регулируя угол управления тиристорами звена (И) в диапазоне $\alpha = \pi/2 \div \pi - \gamma_m$, где γ_m – максимальный угол коммутации, исключающий возможность аварийного режима «опрокидывания» инвертора. Результаты проверки эффективности этого решения подтверждают не только снижение перенапряжений, но и

отсутствие энергетического взаимовлияния приводов с отдельными потоками мощности. Из диаграмм рис. 7 можно убедиться, что происходящие в моменты $t=0,1; 0,15$ с изменения энергетического режима одного из приводов не оказывают какого-либо влияния на величины тока и скорости другого привода. Получило подтверждение и другое упомянутое свойство многодвигательного электропривода с однокомплектным блоком В/(И) на сетевом входе, создающее условия для экстренного выключения всех приводов кордной линии во время аварий: из полученных на рис. 7 диаграмм видно, как предпринятый в момент $t \geq 0,2$ с завершающий перевод блока В/(И) в инверторный режим действительно обеспечил экстренное торможение и одновременное выключение всех приводов кордной линии.

Литература

1. Частотно-регулируемые электроприводы в технологиях шинного производства / С.Н. Сидоров, В.Н. Дмитриев, Р.Н. Ганиев. Под ред. Н.И. Горбачевского. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 223 с.
2. Сидоров С.Н. Система частотно-токового управления электроприводом на базе запираемых вентилей // Приводная техника. 2011. № 1. С. 14–19.
3. Сидоров С.Н. Матричный преобразователь частоты в режимах скалярного управления // Электричество. 2010. № 7. С. 26–33.
4. Разработка, исследование и внедрение частотно-регулируемого электропривода экструдера в производстве автомобильных шин: монография / Р.Н. Ганиев. Нижнекамск: НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2015. 126 с.
5. Ганиев Р.Н., Горбачевский Н.И., Платов В.Н. Проблемы модернизации электроприводов технологических установок экструзионного типа // Известия Тульского государственного университета «Технические науки». Тула: ТулГТУ, 2010. С. 16–22.
6. Горбачевский Н.И. Разработка, исследование и внедрение электротехнического комплекса резиносмесителя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2006.
7. Орлов С.П. Повышение эффективности электрооборудования и системы управления экструзионной линии: дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2005. 193 с.
8. Проектирование экструзионных машин с учетом качества резинотехнических изделий: монография / М.В. Соколов [и др.]. М.: Машиностроение, 2007. 292 с.
9. Раувендаль К. Экструзия полимеров: пер. с англ. А.Я. Малкина. СПб.: Профессия, 2008. 762 с.
10. Основы технологии шинного производства / Г.Я. Власов [и др.]. Воронеж: Государственная технологическая академия, 2002. 459 с.
11. Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью: пер. с англ. Б.И. Копылова. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с. ил.
12. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

Авторы публикации

Сидоров Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ).

Горбачевский Николай Иванович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электротехника и энергообеспечение предприятий» факультета управления и автоматизации Нижнекамского химико-технологического института (филиал) «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Гаврилов Евгений Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и энергообеспечение предприятий» факультета управления и автоматизации Нижнекамского химико-

технологического института (филиал) «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

References

1. Frequency-regulated electric drives in tire production technologies Sidorov, V.N. Dmitriev, R.N. Ganiev. Ed. N.I. Gorbachevsky. - Ulyanovsk: UISTU, 2015. 223 with.
2. Sidorov S.N The system of frequency-current control of the electric drive on the basis of the lockable valves // Drive technology. 2011. № 1. P.14–19.
3. Sidorov S.N. Matrix frequency converter in scalar control modes. // Electricity. 2010. № 7. P. 26–33.
4. Development, research and implementation of frequency-controlled electric drive of an extruder in the production of automobile tires: monograph / R.N Ganiev. Nizhnekamsk: NCTI FSBEI "KNRU", 2015. 126 p.
5. Ganiev R.N, Gorbachevsky N.I, Platov V.N Problems of modernization of electric drives of technological installations of extrusion type // But the Tula State University "Technical Sciences". Tula: TulSTU, 2010. P. 16–22.
6. Gorbachevsky N.I Development, research and introduction of the electrotechnical complex of the rubber-mixer: the author's abstract. dis. ... cand. tech. Nizhny Novgorod, 2006.
7. Orlov S.P Increase of efficiency of electrical equipment and control system of extrusion line: dis. ... cand. tech. - Krasnodar, 2005. 193 with.
8. Designing extrusion machines taking into account the quality of rubber products: monograph / M.V Sokolov [and others]. M.: Mechanical engineering. 2007. 292 p.
9. Rauwendal, K. Extrusion of polymers: Per. with angl.A. J. Malkina / K. Rauwendaal. SPb.: The profession, 2008 762 p.
10. Fundamentals of the technology of tire production / G. Ya. Vlasov [and others] Voronezh: State Technological Academy. 2002. 459 p.
11. Phillips, C. Control systems with feedback: Per. with English. B. I. Kopylova / C. Phillips, P. Harbor. - Moscow: Laboratory of Basic Knowledge, 2001. 616 p. yl.
12. Shreiner, R.T. Mathematical Modeling of AC Drives with Semiconductor Frequency Converters / R.T. Shreiner. Ekaterinburg: Uro RAS. 2000. 654 p.

Authors of the publication

Sidorov Sergey Nikolaevich – Cand. of Technical Sciences, Assistant professor of the electric drive and automation of industrial installations of the power faculty of the Ulyanovsk State Technical University.

Gorbachevsky Nikolay Ivanovich – Cand. of Technical Sciences, Head of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises of the Faculty of Management and Automation of the Nizhnekamsk Institute of Chemistry and Technology «Kazan National Research Technological University».

Gavrilov Evgeniy Nikolaevich – Cand. of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises of the Faculty of Management and Automation of Nizhnekamsk Chemical and Technological Institute «Kazan National Research Technological University».

Поступила в редакцию

27 декабря 2017 года.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.048

ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФАРФОРОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Д.А. Иванов, Г.Д. Марданов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
E-mail: alex.kutuzov@mail.ru

Резюме: Выполнено обследование технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов (ФВИ) типа ИОС 110/400 на двух подстанциях ОАО «Сетевая компания «Казанские электрические сети», с использованием ранее разработанного метода двухканального дистанционного контроля. По результатам измерения набора характеристик частичных разрядов (ЧР) и их компьютерного анализа была произведена диагностика технического состояния 38 ФВИ с разделением на четыре группы: полностью работоспособных; работоспособных на данный момент времени; ограниченно работоспособных и требующих замены при последующих регламентных обследованиях; полностью неработоспособных, требующих немедленной замены.

Ключевые слова: дистанционная диагностика, высоковольтные изоляторы, частичные разряды, электромагнитные и акустические датчики, дефекты.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-99-107

Благодарности: Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 18-08-00203А.

REMOTE CONTROL OF THE TECHNICAL CONDITION OF PORCELAIN HIGH VOLTAGE INSULATORS

A.V. Golenishev-Kutuzov, V.A. Golenishev-Kutuzov, D.A. Ivanov, G.D. Mardanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
E-mail: alex.kutuzov@mail.ru

Abstract: A survey of the technical condition of porcelain high-voltage insulators (IEE 110/400 type) was carried out at two substations of JSC «Grid Company «Kazan electric networks», using

the previously developed method of two-channel remote control. Based on the measurement of a set of partial discharge characteristics (PD) and their computer analysis, the technical condition of 38 PVI was diagnosed with the division into four groups; Fully operational; Workable at the given time; Limited working capacity and requiring replacement during subsequent routine inspections; Completely inoperative, requiring immediate replacement.

Keywords: remote diagnostics, high-voltage insulators, partial discharges, electromagnetic and acoustic sensors, defects.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant 18-08-00203A.

Введение

В опорных высоковольтных изоляторах (ВИ), в ходе длительной эксплуатации, за счет старения фарфора, влияния градиентов температуры, осадков, грозových разрядов или перенапряжения возможно возникновение первичных повреждений (дефектов), их дальнейшее разрастание, что может, в конечном итоге, приводить к разрушению изоляторов. К основным дефектам относятся поверхностные трещины и нарушения плотного контакта между электродами и диэлектрическим стержнем. Особенностью опорных ВИ является то обстоятельство, что они одновременно испытывают как электрическую, так и механическую нагрузку. Более того, контакты между стержнем и фланцами могут испытывать дополнительные механические напряжения вследствие градиентов температур между диэлектриком и металлом. До настоящего времени не разработаны какие-либо стандартизованные методы и соответствующие им устройства для контроля и диагностики технического состояния ВИ дистанционным способом без отключения рабочего напряжения [1–3], поскольку даже новые ГОСТы и стандарты касаются только стендовых испытаний с регулируемым источником высокого напряжения [4; 5]. В наибольшей степени это обстоятельство относится к более старым высоковольтным системам, имеющим в своем составе ФВИ со сроком работы более 20–30 лет [6].

Ранее на кафедре ПЭС КГЭУ были разработаны метод и устройство [7; 8], позволяющие дистанционно измерять характеристики ЧР и по ним определять степень работоспособности ВИ. Этот метод ранее успешно был опробован на серии полимерных ВИ типа ЛК 70/35 [7]. В данной работе сообщается о первом применении разработанного метода для дистанционного контроля технического состояния ФВИ, находящихся под рабочим напряжением.

Изоляторы. Методика измерений

Всего было обследовано 38 ФВИ типа 110/400 на подстанциях «Западная» и «Водозабор». Особенностью этих подстанций является значительный разброс времени ввода ФВИ (от 1974 до 2012 года) и отсутствие каких-либо документированных данных об их состоянии на данный момент. Кроме того, ФВИ на подстанциях расположены на расстояниях не более 5 метров друг от друга, что затрудняло возможность подхода к ним ближе 5 метров. Номинальное напряжение составляло 110 кВ.

Измерения набора характеристик ЧР от каждого из изолятора выполнялись двумя выносными антеннами с усилителями электромагнитных (частота 540 МГц) и акустических (40 кГц) импульсных сигналов ЧР. Расстояние от датчиков до ФВИ составляло порядка 6 метров. Использование узконаправленных антенн позволяло различать сигналы ЧР от конкретных изоляторов. Фазовое рассогласование сигналов ЧР, за счет различия скоростей распространения акустических и электромагнитных волн, устранялось путем точного измерения расстояний с помощью лазерного дальномера. В дальнейшем изложении материала все

результаты измерений характеристик ЧР обоими датчиками приводятся в скорректированном виде, с учетом расстояний между дефектами и датчиками. Однако, в отличие от контактного стендового метода [4; 5], в котором используется измерение таких характеристик ЧР, как интенсивность, частота повторения и момент возникновения ЧР, измерение этих параметров дистанционным методом приводит к значительным погрешностям, зависящим от затухания сигналов, влияния климатических и внешних акустических и электромагнитных помех.

Поэтому нами, в соответствии с результатами предварительного изучения эффектов ЧР, было установлено, что наибольшей диагностической информативностью при дистанционном контроле являются (по степени значимости) такие параметры, как: изменение фазовых интервалов генерации ЧР ($\Delta\phi$), соответствующие наиболее мощным ЧР; их интенсивность ($q_{\text{мощ}}$) и частота повторения ($N_{\text{мощ}}$); распределение числа ЧР по интенсивности, в сравнении с бездефектными и полностью работоспособными изоляторами.

Результаты обследования изоляторов

С учетом ранее выполненного изучения основных дефектов в ФВИ и их влияния на характеристики ЧР [8], наше обследование позволило разделить их на 4 группы по степени дефектности, а, следовательно, и работоспособности. К первой группе относятся полностью работоспособные ФВИ с минимальной интенсивностью ($q < 200$ пКл) и числа ($N < 500$) ЧР, расположенных в фазовых интервалах вблизи 90° и 270° . Ко второй группе – условно работоспособные и не требующие замены ФВИ содержащие ЧР с $q \leq 300$ пКл и $N \leq 1000$ и $\Delta\phi$ в интервалах $50-80^\circ$ и $220-250^\circ$. В третьей группе – ФВИ, сохраняющие работоспособность только в ограниченный интервал времени и требующие особого внимания и даже замены при ближайших регламентных обследованиях. Они отличаются резким, по сравнению с первыми двумя группами, увеличением интенсивности мощных ЧР до 2 нКл, числом в 2–5 раз и сдвигом $\Delta\phi$ интервалов к началу фазовых периодов. Предварительно, по общему техническому состоянию каждой из подстанций и визуальному осмотру ФВИ, не было обнаружено неработоспособных изоляторов, требующих немедленной замены и отнесенных к четвертой группе. Усредненные параметры характеристик ЧР для трёх групп представлены в таблице, а сами характеристики – на рис. 1–3. Было установлено значительное различие в распределении количества ЧР по интенсивностям. В бездефектных ФВИ большинство ЧР относятся к узкому интервалу интенсивности, и этот интервал значительно возрастает с ростом дефектности изоляторов.

Таблица

Параметры характеристик ЧР для трех групп ФВИ; $\Delta\phi$ – фазовые интервалы генерации ЧР;
 q – заряд; N — количество ЧР за полупериод, знаки тах обозначают параметры
 ЧР с интенсивностью выше 100 пКл.

Параметры	Группа	1		2		3	
	методы	э-м	ак	э-м	ак	э-м	ак
	Фазы, град						
$\phi/\Delta\phi$	0–180	60–80	60–80	50–70	50–70	30–50	30–50
	180–360	240–260	240–260	230–250	220–240	210–240	210–240
q , пКл	0–180	180	130	270–280	220–240	210–240	210–240
	180–360	220	230	240–250	260–280	650	680
N	0–180	500	400	800	950	2000	3000
	180–360	200	600	900	1000	2200	2900
$\phi/\Delta\phi_{\text{max}}$	0–180	0	0	0	0	40-60	40-60
	180–360	0	0	0	0	220-240	220-240
q_{max}	0–180	0	0	0	0	2 нКл	1,8 нКл
	180–360	0	0	0	0	2 нКл	1,8 нКл
N_{max}	0–180	0	0	0	0	100	100
	180–360	0	0	0	0	80	80

Установлено, что по параметрам ЧР большинство обследованных изоляторов относятся к первой (8 шт.) и второй (25 шт.) группам и только пять ФВИ — к третьей группе. В целом нужно констатировать, что предложенный набор характеристик ЧР позволяет достаточно точно разделять работоспособные (1 и 2-я группы) от ограниченно работоспособных изоляторов (3-я группа), поскольку, если параметры ЧР первых двух групп различаются на 50–80%, то различие их от третьей группы превышало интенсивность мощных ЧР в 5–8 раз.

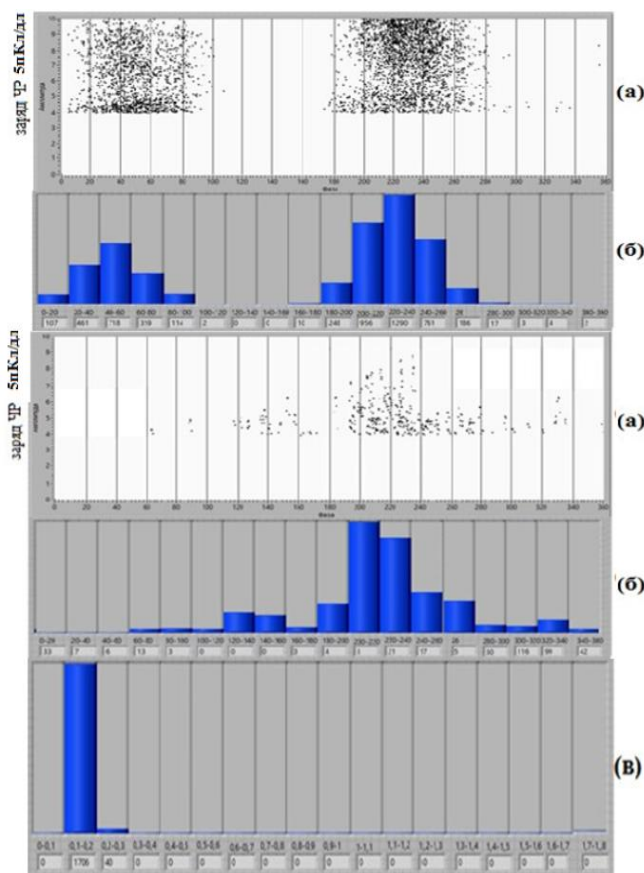


Рис 1. Характеристики ЧР для работоспособного бездефектного изолятора № 3: амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; (в) — распределение количества (N) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, в зависимости от интенсивности

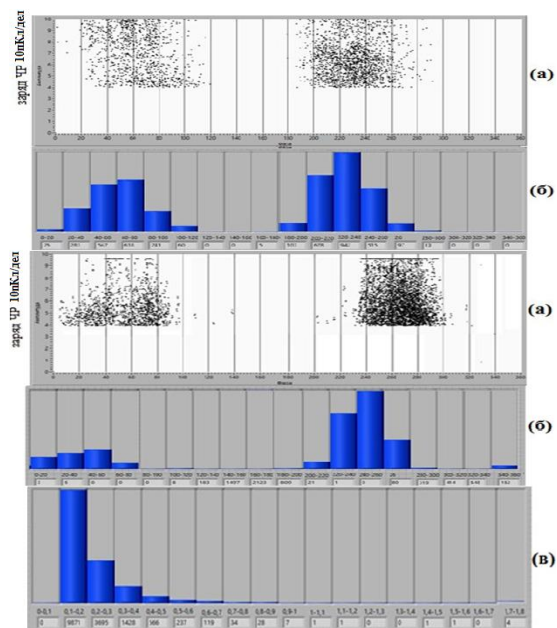


Рис. 2. Характеристики ЧР для работоспособного, мало дефектного изолятора № 2: амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; (в) — распределение количества (N) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком в зависимости от интенсивности

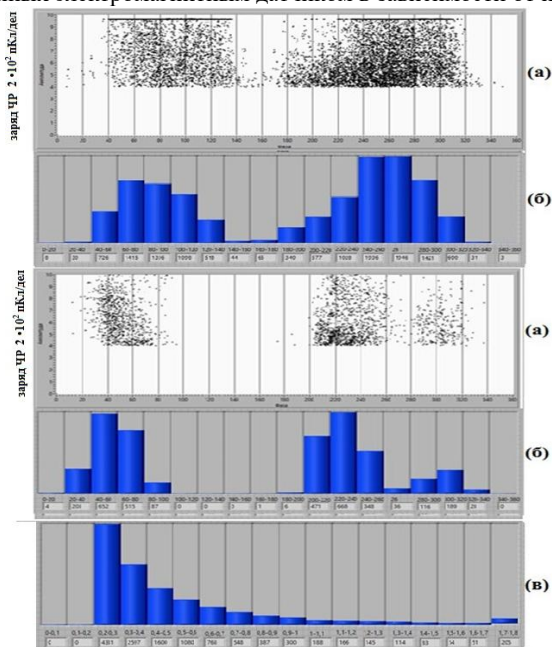


Рис. 3. Характеристики ЧР для неработоспособного дефектного изолятора № 6: амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; (в) — распределение количества (N) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, в зависимости от интенсивности

Более углубленный анализ параметров характеристик ЧР показал возможность на их основе определять тип дефекта, и даже место его расположения. Как ранее было установлено [9; 10], для ФВИ наиболее характерны поверхностные трещины в диэлектрическом стержне и неплотные контакты между стержнем и фланцами (оконцевателями). В первом виде дефектов электрические пробой (перекрытия) возникают за счет повышения напряженности E в воздушном зазоре, по сравнению с напряженностью E_0 в диэлектрике, определяемым как:

$$E/E_0 = \frac{\varepsilon}{\frac{d}{d_0}(\varepsilon - 1) + 1},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость фарфора; d – ширина зазора; d_0 – длина диэлектрика. В реальных условиях размер зазора может изменяться в пределах от 1 до 20 мкм, а d_0 – порядка 100 см и превышение, E/E_0 , будет пропорционально ε .

Поскольку ЧР в основном возникают вследствие процессов ионизации воздушного зазора, то их появление определяется размерами трещины. Равномерное распределение числа и интенсивности ЧР в обоих полупериодах сети соответствует симметричности расположения поверхности зазора в приложенном поле, что вполне удовлетворяет характеристикам ЧР для двух первых групп ФВИ. Небольшая интенсивность ЧР вполне соответствует малым размерам трещин, которые незначительно влияют на электрофизическое состояние ФВИ.

Резкая фазовая асимметричность ряда характеристик ЧР, также как и значительно большая их интенсивность в третьей группе, позволила связать некоторые мощные ЧР с дефектами между стержнем и оконцевателем.

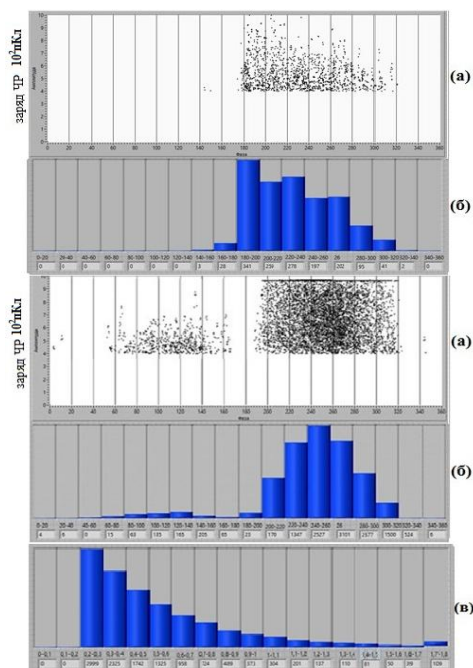


Рис. 4. Характеристики ЧР для неработоспособного, дефектного изолятора № 7 (корона): амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; (в) – распределение количества (N) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, в зависимости от интенсивности

Электрический пробой в этом дефекте, как это уже рассматривалось теоретически [7] и экспериментально [8] на модельных образцах, имеет более сложный вид, чем при поверхностном пробое трещины. В данном случае, пробой контакта, состоящего из электрода, зазора и стержня, происходит в воздушном зазоре за счет нормальной к зазору компоненты поля путем излучения электронов из электрода (катода). В результате электронной бомбардировки поверхности диэлектрического стержня на последней образуется индуцированное положительно заряженное поле ионов с плотностью до 10^{-6} – 10^{-5} Кл/см, которое успевает изменить знак при изменении фазы приложенного напряжения на 180° . Таким образом, момент возникновения и интенсивность ЧР определяются знаком и напряженностями приложенного и индуцированного полей. Как показали расчёты и измерения, именно после перехода приложенного поля в отрицательную фазу возникает условие суммирования обоих полей, что сопровождается генерацией самых мощных ЧР. Интенсивность ЧР также зависит от площади и ширины зазора между электродом и диэлектрическим стержнем. Поскольку в условиях длительной эксплуатации эти параметры имеют случайный и неконтролируемый характер, то именно интенсивность и число несимметричных по фазовым полупериодам ЧР может определяться параметрами дефекта. Более того, при длительной эксплуатации подобного дефектного контакта вследствие электронно-тепловых процессов [11] происходит ускоренное старение и даже повреждение диэлектрика, что, в конечном итоге, снижает электрическую плотность изолятора.

Заключение

Выполнено обследование серии фарфоровых высоковольтных изоляторов и разделение их на работоспособные и неработоспособные по предложенному набору характеристик ЧР. Не менее важной является возможность определения места расположения и вида ЧР. Дальнейшее усовершенствование метода возможно с дополнительным применением оптических и тепловизионных приборов нового поколения.

Литература

1. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Об оценке параметров частичных разрядов // Электричество. 2016. № 6.
2. Sasaki A., Kato S., Takahashi E. Simulation of discharge in insulating das from initial partial discharge to growth of a stepped leader using the percolation model // Japan Jom. Appl. Phys. 2016. V. 55, No. 2.
3. Martinez-Tariba J.M., Ardila-Rey J., Robles G. Partial discharge source recognition by means of clustering of spectral power ratios // Meas. Science and Technol. 2013, V. 24, No. 12.
4. ГОСТ Р 55191-2012. Методы испытаний высоким напряжением. Измерение частичных разрядов. М.: Стандартинформ, 2014.
5. Международный стандарт IEC 60060-1:2010 (NEQ). Методы испытаний высоким напряжением. Часть 1. Общие определения и требования к испытаниям. М.: Стандартинформ, 2010.
6. Диагностика технического состояния фарфоровых изоляторов высоковольтных коммуникационных аппаратов // Рекомендации Всероссийского семинара. М.: 27–29 октября 1999.
7. Способ бесконтактной диагностики высоковольтных полимерных изоляторов: пат. 2483315 Российская Федерация. МПК GOIR 31/12 / Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Евдокимов Л.И., Черномашенцев А.Ю.; опубл. 2013.
8. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Синюгин И.В., Хуснутдинов Р.А., Марданов Г.Д. Дистанционная диагностика высоковольтных полимерных изоляторов // Проблемы энергетики. 2014. № 7–8. С. 77–82.
9. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Хуснутдинов Р.А., Марданов Г.Д. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 87–93.
10. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1994.

11. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и дистанционные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков // Екатеринбург: изд-во УрО РАН, 2000.

Авторы публикации

Голенищев-Кутузов Александр Вадимович — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: alex.kutuzov@mail.ru.

Голенищев-Кутузов Вадим Алексеевич — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Иванов Дмитрий Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Марданов Георгий Дамирович — магистр техники и технологий, аспирант кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Kinsht N.V., Petrun'ko N.N. Ob otsenke parametrov chastichnykh razryadov // Elektrichestvo. 2016. No. 6.
2. Sasaki A., Kato S., Takahashi E. Simulation of discharge in insulating das from initial partial discharge to growth of a stepped leader using the percolation model // Japan Jom. Appl. Phys. 2016. V. 55, No. 2.
3. Martinez-Tariba J.M., Ardila-Rey J., Robles G. Partial discharge source recognition by means of clustering of spectral power ratios // Meas. Science and Technol. 2013, V. 24, No. 12.
4. GOST R 55191-2012. Metody ispytaniy vysokim napryazheniem. Izmerenie chastichnykh razryadov. M.: Standartinform, 2014.
5. Mezhdunarodnyi standart IEC 60060-1:2010 (NEQ). Metody ispytaniy vysokim napryazheniem. Chast' 1. Obshchie opredeleniya i trebovaniya k ispytaniyam. M.: Standartinform, 2010.
6. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya farforovykh izolyatorov vysokovol'tnykh kommunikatsionnykh apparatov // Rekomendatsii Vserossiiskogo seminara. M.: 27□29 oktyabrya 1999.
7. Sposob beskontaktnoi diagnostiki vysokovol'tnykh polimernykh izolyatorov: pat. 2483315 Rossiiskaya Federatsiya. MPK GOIR 31/12 / Golenishchev-Kutuzov V.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Evdokimov L.I., Chernomashentsev A.Yu.; opubl. 2013.
8. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Sinyugin I.V., Khusnutdinov R.A., Mardanov G.D. Distsionnaya diagnostika vysokovol'tnykh polimernykh izolyatorov // Problemy energetiki. 2014. № 7–8. S. 77□82.
9. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., Khusnutdinov R.A., Mardanov G.D. Kompleksnyi metod distantsionnogo kontrolya sostoyaniya vysokovol'tnykh izolyatorov // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2016. No. 5–6. P. 87–93.
10. Ushakov V.Ya. Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya. M.: Energoatomizdat, 1994.
11. Vershinin Yu.N. Elektronno-teplovye i distantsionnye protsessy pri elektricheskoy probe tverdykh dielektrikov // Ekaterinburg: izd-vo UrO RAN, 2000.

Authors of the publication

Alexander V. Golenishchev-Kutuzov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Industrial Electronics and Lighting Technology of Kazan State Power Engineering University. (420066,

©А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Д. А. Иванов, Г. Д. Марданов

Kazan, Krasnoselskaya St., 51) e-mail: alex.kutuzov@mail.ru

Vadim A. Golenischev-Kutuzov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Industrial Electronics and Lighting Technology of the Kazan State Power Engineering University.

Dmitriy A. Ivanov — Cand. Sci. (Technical), Assistant Professor of the Department of Industrial Electronics and Lighting Technology of the Kazan State Power Engineering University.

George D. Mardanov — Master of Engineering and Technology, Graduate Student of the Department of Industrial Electronics and Lighting Technology of the Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

03 декабря 2017 года.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ДЕФЕКТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

А.Ю. Кубарев, А.Б. Закирова, Ю.Г. Кубарев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: на основе фрактальных представлений о структуре материала и конструктивных особенностей электрооборудования изучаются свойства электромагнитных полей в реальных условиях. В расчетах принимаются во внимание фрактальные характеристики дефектных материалов и фрактальная структура самого поля. Предлагаются методы обнаружения перераспределения интенсивности электромагнитного поля за счет явления дифракции, рассеяния и взаимодействий на неоднородностях объектов оборудования.

Ключевые слова: дефекты, фракталы, электрооборудование, электромагнитное поле, шероховатость, вязкие пальцы.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-108-115

RESEARCH METHODS OF THE PROPERTIES OF DEFECTIVE ELECTRICAL EQUIPMENT

A.Yu. Kubarev, A.B. Zakirova, Yu.G. Kubarev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: The properties of electromagnetic fields in real conditions based on the fractal representations of the structure of material and design features of electrical equipment are studied. In calculating, the fractal characteristics methods are being suggested for the detection of redistribution of intensity of electromagnetic field due to the occurrence of diffraction, scattering and interaction with the heterogeneity of the components of equipment.

Keywords: defects, fractals, electrical equipment, electromagnetic field, roughnesses and viscous fingers.

Введение

Со временем практически любое электрооборудование выходит из нормального режима работы вследствие физического износа, усталостных явлений материалов и конструкций, из-за дефектов, развивающихся в процессе его эксплуатации. Отсюда различные материалы и конструкции оборудования принимают определенную форму структурной организации, которая оказывает существенное влияние на распределение электромагнитных полей, на их рассеяние и излучение. Изучая особенности этих полей, можно получить необходимую информацию о структуре материала, о природе несовершенств или о поведении оборудования в процессе эксплуатации.

Поэтому основная цель работы связана с изучением механизмов связи между характеристиками волновых процессов и параметрами несовершенных структур реальных материалов или объектов. Особое внимание уделено нетрадиционным структурным

нарушениям изделий, которые приводят к избирательным электромагнитным излучениям и их усилению. Несовершенства проводящих материалов учитываются на уровне поверхностных нарушений и дефектности в пределах скин-слоя [1].

Другая отличительная особенность данной работы состоит в использовании методов расчета, способных изучить распределение электромагнитных полей как в идеальных, так и в дефектных структурах без ограничения на концентрацию дефектов, что является основным недостатком большинства методов. В перспективе имеется возможность разработки и создания автоматизированной системы контроля за распределением электромагнитного излучения электрического оборудования в процессе эксплуатации с выходом на решение проблем его непрерывного диагностирования.

Модельные представления о процессе

Особенности электромагнитных полей электротехнического оборудования возникают в результате появления развивающихся дефектов в процессе его эксплуатации. Поэтому в зависимости от типа дефектов и механизмов взаимодействия электромагнитного поля с ними происходит перераспределение поля в пространстве по интенсивности. Наиболее известное явление такого сорта – это дифракция. Но даже при дифракции учет типа дефектов, и особенно их концентрации представляет существенную трудность. В связи с этим требуется такая модель структуры, которая позволяет с единых позиций рассматривать задачи данного типа. В качестве таковой в работе выбрана дефектная структура фрактального типа [2; 3]. При этом дефекты или сами имеют фрактальную структуру, или имеют фрактальное распределение, или электромагнитное поле само фрактально [4]. Хотя класс фрактальных объектов достаточно широк и такой метод актуален, тем не менее, в общем случае, в приближении мультифракталов, фрактальный анализ становится справедливым и для любых других неоднородных состояний. Следовательно, в рамках таких представлений нет необходимости моделировать дефекты или конкретизировать их свойства, а достаточно задать значение фрактальной размерности, которая может быть определена из других независимых экспериментов или теорий. Любые эволюционные или концентрационные изменения проявятся на величине размерности, поскольку спектральная плотность случайной переменной изменится и, в силу масштабной инвариантности, скорее всего, будет изменяться по степенному закону от экстенсивной переменной. Конечно, наиболее корректный подход к проблеме распространения волн требует учета особенностей дисперсии спектра колебаний, а не спектральной плотности. Но в первом приближении в пределах масштаба самих фрактальных образований достаточно ограничиться этим фактором, даже в случае независимых излучателей, из-за их необычной зависимости интенсивности излучения или рассеяния от расстояния.

Дифракция и фрактальные свойства

В первом приближении рассмотрим рассеяние волн фрактальными поверхностями проводящих материалов. Для электромагнитных полей этот механизм, по-видимому, будет основным из-за скин-эффекта. В рамках данной задачи угловое распределение интенсивности рассеянных волн определяется уклонами неровной поверхности. Поскольку фрактальная поверхность не дифференцируема, то она не имеет определенных уклонов. Но на ней существуют неровности всех масштабов. Такую задачу о рассеянии на неровной поверхности можно свести к дифракции волн на экране со случайным значением оптической длины $kh(x)$.

Для Гауссова распределения случайной величины $h(x)$ можно записать следующую корреляционную функцию:

$$R(x) = \exp \left[-\frac{1}{2} k^2 \cdot L^{2(1-H)} |x|^{2H} \right];$$

для структурной функции типа

$$\langle (h(\xi + x) - h(\xi))^2 \rangle = L^{2(1-H)} x^{2H}, \quad 0 < H < 1.$$

Здесь x – координата вдоль поверхности; k – волновое число; L – характерный масштаб для поверхности с одномерными неровностями. Отсюда, после Фурье-преобразования корреляционной функции, получаем угловое распределение интенсивности волны рассеяния:

$$I(\sin \theta) = \int R(x) \exp(ik \sin \theta x) dx.$$

Следует заметить, что перераспределение интенсивности при дифракции у границы дефекта имеет место и при классическом рассмотрении [5]. Так при углах дифракции α интенсивность I равна

$$I = I_0 \left[1 + \sqrt{\frac{1}{\pi}} \cdot \frac{\sin(\alpha^2 - \frac{\pi}{4})}{\alpha} \right].$$

Как видно из последнего выражения, первый дифракционный максимум соответствует $I/I_0 = 1,37$, что почти на 40% увеличивает излучение в ближней зоне.

Другой подход связан с определением угловой зависимости интенсивности рассеяния волн $I(q)$ на неоднородностях диэлектрической проницаемости в пределах фрактальной поверхности и глубины скин-слоя:

$$I(q) \approx \int \langle \varepsilon(r) \cdot \varepsilon(r + r') \rangle \exp(-iqr') dV'.$$

Здесь $|q| = (4\pi/\lambda) \sin \theta/2$ – вектор рассеяния, определяющийся углом рассеяния θ к направлению падающей волны и длиной падающей волны λ . Если корреляционная функция диэлектрической проницаемости пропорциональна корреляции плотности фрактального кластера, то

$$\langle \varepsilon(r) \cdot \varepsilon(r + r') \rangle \approx |r'|^{d_f - d}.$$

Отсюда следует, что в общем случае фрактальная размерность d_f отличается от размерности пространства d , в которое вложен фрактальный объект. Оставляя только зависимость $I(q)$ от вектора рассеяния, получаем

$$I(q) \approx q^{-d_f}.$$

Для определенных фракталов такая зависимость выполняется только в ограниченном диапазоне масштабов $\frac{1}{L} < q < \frac{1}{a_0}$ (здесь a_0 – характерный размер межуатомных расстояний, L – характерный размер кластера). Следовательно, фрактальная размерность определяет скейлинг структурного фактора, а это означает, что рассеяние фрактального типа возможно лишь для определенного набора неоднородностей или дефектов. К такой же форме интенсивности рассеяния приводят рассеиватели, если диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(r)$ принимает случайные и независимые значения в форме $\varepsilon(r - r_i)^\beta$. В этом случае в выражении для спектральной плотности d_f заменяется на показатель $2(\beta + d)$.

Фрактальная структура поля

Фрактальная структура электромагнитного поля может проявиться на пространственном распределении интенсивности или на форме волновой поверхности. Первое свойство связано с нелинейными волновыми проявлениями, а второе определяется самоподобным участком спектра. Для рассмотрения этих случаев используем мультифрактальный анализ, который применим не только к самоподобным объектам. (Здесь мультифрактал – это объединение фрактальных множеств разных размерностей). Наиболее полезен этот анализ для реальных сигналов. В этом случае вводится понятие спектра

сингулярностей сигнала $f(\alpha)$, который, в отличие от спектра мощности или корреляционных функций, несет уже непосредственно информацию о локальной структуре объекта или процесса. С другой стороны, при наличии скейлинга структурной функции волнового процесса $f(\alpha)$ – есть фрактальная размерность, что дает связь между структурной функцией непрерывного процесса $y(t)$ с $f(\alpha)$:

$$\begin{aligned} \langle |y(t) - y(t + \tau)|^v \rangle &= \int \tau^{\alpha v - f(\alpha)} d\alpha \approx \tau^{\alpha_0 v - f(\alpha_0)} ; \\ \left(\frac{df}{d\alpha} \right)_{\alpha=\alpha_0} &= v(\alpha_0) . \end{aligned}$$

Следует заметить, что размерность $f(\alpha)$ преобразованием Лежандра связана с размерностью Реньи d_v с помощью соотношения

$$(v-1)d_v = v\alpha_0 - f(\alpha_0) .$$

Таким образом, задача о локальной неоднородности свелась к изучению распределения фрактальной размерности мультифрактала.

Существенным фактором, влияющим на распространение волн в направляющих структурах (волноводах), является степень «шероховатости» волновода вдоль направления распространения. Эта «шероховатость» поверхности связана либо с ее механической обработкой, либо с ее нарушениями в процессе эксплуатации. Следует заметить [1], что термин «шероховатость» является относительным понятием. В зависимости от масштаба измерения и величины фрактальной размерности поверхность проводника может быть «шероховатой» или гладкой.

В некоторых случаях нарушение поверхности можно представить и как периодическое возмущение вдоль волновода [7]. При этом некоторые лучи, длина волны которых сравнима с размером нарушений, распространяются по линии нерегулярного вида. Если же к тому же поверхность волновода сама имеет нерегулярную структуру, то длина пути луча и время распространения будут зависеть от степени «шероховатости». Следуя работе [7], рассмотрим волновод с абсолютно отражающими стенками, одна из которых имеет «шероховатость» в форме регулярной или случайной функции. Кривая, описывающая отклонение стенки от идеальной на периоде L , задается функцией $L\chi(\xi)$, аргумент которой есть дробная часть нормированной координаты z/L и меняется в интервале $0 < \xi < 1$ (z – текущая координата вдоль распространения волны). Если θ_n – угол между лучем и осью z после n -го отражения, ψ_n – координата луча на «шероховатой» поверхности, а h – ширина волновода, то эти параметры связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} z_{n+1} &= \psi_n + [h + L\chi(\xi_n)] \operatorname{ctg} \theta_{n+1} ; \\ \psi_n &= z_n + [h + L\chi(\xi_n)] \operatorname{ctg} \theta_{n+1} ; \\ \theta_{n+1} &= \theta_n - 2 \operatorname{arctg} \chi(\xi_n) , \quad \xi_n = \{\psi_n / L\} . \end{aligned}$$

Частота колебаний траектории луча $\eta = N/z_n$ зависит от начального угла выхода луча θ_0 . Оценки показывают, что η принимает лишь рациональные значения, хотя имеется интервал значений θ_0 , когда частоты η остаются постоянными. Отсюда ясно, что зависимость η от θ_0 не относится к непрерывным функциям, а по своему поведению представляют собой «чертову лестницу» даже для «шероховатости» регулярного типа [7; 8]. Ступенчатая кривая η от θ_0 заполняет не весь интервал значений θ_0 . Более того, степень заполнения зависит от шага вычислений или от масштаба измерений r , что указывает на фрактальность данной зависимости. Следовательно, степень заполнения $A(r)$ будет определяться величиной фрактальной размерности d :

$$A(r) \cong r^{-d} .$$

Произвольный вид функции $\chi(\xi)$, по-видимому, не скажется на качественной картине явления, а будет определять лишь количественные значения параметров. Правда, этот вывод справедлив для таких масштабов r , которые еще «чувствуют» фрактальность системы.

Модель образования вязких пальцев

Изучение явления образования вязких пальцев началось с модели течения жидкости в ячейке Хеле-Шоу, которая представляет собой две прозрачные пластины, внутри которых вода обтекает различные предметы. При турбулентном течении жидкости линии тока хаотически перепутывались. Если в ячейке Хеле-Шоу имеется две жидкости, то граница раздела жидкостей оказывается неустойчивой и при инжектировании жидкости меньшей вязкости неустойчивость такого рода приводит к образованию вязких пальцев, структура которых определяется хаотической динамикой движения границы. Градиент давления между жидкостями на границе, связанный с действием капиллярных сил, является возмущающим фактором данного случайного процесса. В случае же электрического пробоя диэлектрика возникновение проводящей фазы связано с достижением электрического поля критического значения. Наблюдаемая при этом проводящая фаза стохастически растет, имея характерную геометрическую картину, схожую с вязкими пальцами. Основной научный практический интерес, связанный с задачами такого сорта, формулируется в виде двух вопросов: Имеет ли процесс роста вязких пальцев и электрического пробоя глобальный характер или ограничен некоторой областью пространства? Можно ли описать геометрическую картину явления и объяснить ее исходя из закона роста? Использование геометрических фрактальных представлений позволяет, с одной стороны, применить достаточно общий метод для решения этих вопросов, а с другой – характеризовать картину явления количественными параметрами: фрактальной размерностью и критическими показателями.

Таким образом, проблема образования вязких пальцев в пористых средах, которая в первоначальном варианте имела существенное значение лишь при добыче нефти, представляет интерес и для гидродинамики, и для физики пористых сред. Ранее было показано [2], что вязкие пальцы в пористых средах имеют фрактальную природу, и поэтому в настоящей работе предлагается данная модель для изучения распространения электромагнитных волн в ограниченном объеме типа кластера. Поскольку вязкие пальцы имеют разветвленную структуру, то их процесс образования является неустойчивым. При последовательном случайном дроблении вязкие пальцы перерастают в разветвленные кластеры, плотность которых убывает со временем и размером, а сами они представляются структурами фрактального типа. Поэтому, этот структурированный хаос можно описывать с помощью фрактальных геометрических представлений. Отсюда, фронт электромагнитной волны, например, имеет нерегулярную поверхность. Эти коренные изменения геометрии требуют изменить и математические методы описания. В связи с этим в работе используются методы анализа процессов, основанные на дробном дифференцировании и интегрировании, что предполагает установление связи параметров дробной размерности с порядком дробной производной.

Общность физических явлений позволяет заключить, что модель вязких пальцев может быть использована и в других областях естествознания, и в частности, при объяснении образования дендритов некоторых минералов и металлов. Общность состоит и в том, что скелет структуры начинает возникать с некоторого центра. Затем при дальнейшем росте исходная структура начинает в своих концевых ветвях удваиваться. Обнаружены и отличия, которые сводятся к тому, что у фрактальных пальцев главные ветви более прямые, чем у кластеров. К задачам данного типа относятся и модель пробоя диэлектриков, модель электролитического осаждения, модели диффузионно-ограниченных агрегаций, модели образования трещин и необратимого роста, а также явление перколяции или протекания. С учетом этих представлений в работе описываются эффективные алгоритмы, позволяющие

осуществлять численное моделирование и производить отбор моделей переноса для конкретных неустойчивостей.

Чтобы понять и смоделировать процесс неустойчивости границы волновой поверхности, рассмотрим в качестве возмущающего фактора синусоидальную волну, приложенную вдоль оси x .

$$\psi(x, t) = A \exp(2\pi\delta t + j \frac{2\pi x}{\lambda}). \quad (1)$$

Здесь λ – длина волны возмущения; δ – скорость нарастания возмущения.

Отсюда ясно, что граница раздела устойчива, если возмущение $\psi(x, t)$ со временем затухает, что возможно лишь при $\delta < 0$. Эволюция границы раздела может быть получена из уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \Delta \vec{v}. \quad (2)$$

Поскольку многие жидкости можно считать практически несжимаемыми, то кинематическая вязкость $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ определяется коэффициентами вязкости η и плотности ρ .

Если поверхность раздела между двумя жидкостями покоится, то между этими жидкостями существует разность давлений за счет действия капиллярных сил в ячейке Хеле-Шоу:

$$p_1 - p_2 = \sigma \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right), \quad (3)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, а R_x и R_y – радиусы кривизны на границе раздела жидкостей в направлении осей X и Y .

Пусть жидкость с меньшей вязкостью движется со скоростью $\bar{U}$ вдоль оси Z . В этом направлении будет двигаться и фронт вытеснения. Решая уравнения (2) и (3) в линейном приближении по возмущению $\psi(x, t)$ находим, что начиная с некоторого значения $\lambda \geq \lambda_c$ фронт вытеснения оказывается неустойчивым. Критическая длина волны λ_c определяется коэффициентом поверхностного натяжения σ , приведенными коэффициентами кинематических вязкости ν_1 и ν_2 и скоростью движения фронта вытеснения V .

$$\lambda_c = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{(\nu_2 - \nu_1)(V - \nu_c)}}.$$

При учете гравитационных эффектов в ячейке Хеле-Шоу решение для скорости U выбиралось в виде

$$V = -\frac{1}{\nu} \nabla(p + \rho \cdot g \cdot z).$$

Критическая скорость V_c связана с учетом гравитационных эффектов и равна

$$V_c = \frac{g(\rho_1 - \rho_2)}{\nu_2 - \nu_1}.$$

Хотя неустойчивость границы возникает уже при $\lambda \geq \lambda_c$, но наибольшая скорость нарастания вязких пальцев на начальной стадии развивается особенно для характерной длины $\lambda^* = \sqrt{3}\lambda_c$, что при условии $\eta_2 \gg \eta_1$ дает

$$\lambda^* \approx \pi \sqrt{\frac{\sigma}{V\eta}}.$$

В более поздней стадии развития, как установлено экспериментально [10], длинные пальцы начинают тормозить рост соседей, т.е. по мере роста структуры пальцы расширяются. При достижении ширины $2\lambda^*$ пальцы начинают дробиться на более мелкие,

приближая картину дробления к фрактальной. Величина фрактальной размерности, например, для вытеснения водой смеси склероглутана с водой равна $d_f = 1,70 \pm 0,05$ [10].

Следует отметить, что форма вязких пальцев существенным образом зависит от природы среды, в которой они реализуются, хотя для них используются те же уравнения (1), (2), (3). Так, в двумерных пористых средах вязкие пальцы в большей степени напоминают дендриты металлов или картину электрического пробоя. Вязкие пальцы не всегда имеют фрактальную структуру. Поскольку динамика фронта вытеснения различна, то это говорит о влиянии на процесс образования вязких пальцев и других факторов, а не только распределения давления и граничных условий. В пористой среде главными факторами являются давление в менее вязкой жидкости и капиллярное давление конкретной поры, что вносит в данный процесс элемент случайности, так как ширина пор есть величина случайная с некоторым распределением. Следовательно, для образования вязких пальцев требуется случайность на уровне геометрии пор [11], что было показано методами численных экспериментов [2].

Выводы

Таким образом, дефекты материалов, конструкций и деталей электрооборудования существенно влияют на перераспределение интенсивности электромагнитного поля, особенно в ближней зоне. Этот результат получен благодаря применению метода фрактального анализа, который качественно изменяет подходы к изучению волновых явлений в несовершенных структурах. Применение этого метода также целесообразно при исследовании свойств электромагнитных полей в неоднородных средах и при нелинейном взаимодействии волн. Используя понятие фрактальной размерности, количественную характеристику можно сопоставить такому свойству поверхности, как «шероховатость», которое теперь может быть задано определенным значением d .

В качестве уравнений для описания явления образования вязких пальцев можно использовать и уравнения переноса (теплопроводности, диффузии или импульса). При этом влияние нелинейностей среды учитываются в граничных и начальных условиях. В связи с этим уравнение Навье-Стокса оказывается предпочтительным, поскольку в случае нелинейного (турбулентного) процесса решение уравнений тепломассопереноса усложняются и за счет нелинейных граничных условий, и из-за сложной хаотической динамики.

Следовательно, модель вязких пальцев более корректно учитывает излучение волны в вязких, пористых и других нелинейных средах в режиме турбулентности. Особый интерес представляет случай фрактальных вязких пальцев [4], когда хаотическая динамика в рамках представлений дробной размерности может быть частично или полностью структурирована, т.е. хаос имеет определенную структуру, которая характеризуется конкретной фрактальной размерностью.

Литература

1. Кубарев Ю.Г., Баширов З.А., Бушара Салахельдин. Частотная зависимость активного сопротивления проводников с дефектной структурой // Известия вузов. Проблемы энергетики. 1999. № 9–10. С. 102–106.
2. Федер Е. Фракталы. 2-е изд. М.: УРСС: Ленанд, 2014.
3. Пайтген Х.О., Рахтер П.Х. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем. М.: Мир, 1993.
4. Фракталы в физике / под ред. Л. Пьетронеро и Э. Тозатти. М.: Мир, 1988.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
6. Баширов З.А., Бушара Салахельдин, Кубарев Ю.Г. Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология. Казань, 2000. С. 299–300.
7. Абдуллаев С.С., Заславский Г.М. // Акуст. журнал. 1988. Т. 34, № 4. С. 578–582.
8. Bak P., Bruinsma R. Phys. Rev. Letters 1982. Vol. 49, No. 4. P. 249–252.

9. Daccord G., Nuttmann J., Stenley H.E. On growth an form (eds. H.E. Stenley, D.N. Ostrowsky) Dardrech, 1986, pp. 203–210.
10. Chen J.D., Wilkinson D. Phys. Rev. Lett. 1985. No. 55, pp. 1892–1895.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015.

Авторы публикации

Кубарев Артем Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: artemkubarev@yandex.ru.

Закирова Альбина Булатовна – ассистент кафедры «Теоретических основ электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: albinasi@mail.ru.

Кубарев Юрий Григорьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теоретических основ электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: artemkubarev@yandex.ru.

References

1. Bashirov Z.A., Bushara Salakhel'din, Kubarev Yu.G. Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 1999. No. 9–10, P. 102–106.
2. Feder E. Fraktaly. 2-e izd. M.: URSS: Lenand, 2014.
3. Paitgen Kh.O., Rakhter P.Kh. Krasota fraktalov. Obrazy kompleksnykh dinamicheskikh sistem. M.: Mir, 1993.
4. Fraktaly v fizike / pod red. L. P'etronero i E. Tozatti. M.: Mir, 1988.
5. Landau L.D., Lifshits E.M. Elektrodinamika sploshnykh sred. M.: FIZMATLIT, 2005.
6. Bashirov Z.A., Bushara Salakhel'din, Kubarev Yu.G. Vnutrikamernye protsessy v energeticheskikh ustanovkakh, akustika, diagnostika, ekologiya. Kazan', 2000. P. 299–300.
7. Abdullaev S.S., Zaslavskii G.M. // Akust. zhurnal. 1988. Vol. 34, No. 4, P. 578–582.
8. Bak R., Bruinsma R. Phys. Rev. Letters 1982. V. 49, No. 4. P. 249–252.
9. Daccord G., Nuttmann J., Stenley H.E. On growth an form (eds. H.E. Stenley, D.N. Ostrowsky) Dardrech, 1986, pp. 203–210.
10. Chen J.D., Wilkinson D. Phys. Rev. Lett. 1985. No. 55, pp. 1892–1895.
11. Landau L.D., Lifshits E.M. Gidrodinamika. M.: FIZMATLIT, 2015.

Authors of the publication

A. Yu. Kubarev – Cand. Sci. (techn.), associate professor Department of “Electric Stations” of “Kazan State Power Engineering University”.

A. B. Zakirova – assistant Department of “Theoretical basis of electrical engineering” of “Kazan State Power Engineering University”. E-mail: albinasi@mail.ru.

Yu. G. Kubarev – Dr. Sci. (phys.-math.), professor Department of “Theoretical basis” of electrical engineering” of “Kazan State Power Engineering University”.

Поступила в редакцию

11 июля 2017 года.

УДК 621.311.22(075.8)

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЁМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОКСОВОЙ ЗАСЫПКИ В СИСТЕМАХ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ МОДЕЛИ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ В ФОРМЕ ПОЛУСФЕРЫ

В.Г. Киселев, Е.Н. Рузич, Ч.В. Чунг

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

г. Санкт-Петербург, Россия

kis_vg@mail.ru, rouzith@mail.ru

Резюме: В работе на базе модельных представлений для анодного заземления системы катодной защиты в форме одиночной полусферы, которая расположена на поверхности грунта, и наличия коксовой засыпки рассчитано оптимальное, в смысле критерия «годовые приведённые затраты», количество кокса. Одновременно произведён расчет для аналогичного заземления, но без использования коксовой засыпки, что позволило провести их сравнительный анализ и рассчитать их сравнительную экономическую эффективность в зависимости от удельного сопротивления грунта. В результате данных расчётов предложено модернизированное анодное заземление с нормированным количеством коксовой засыпки, которое обладает повышенной безопасностью по сравнению с традиционным изделием, так как, в частности, позволяет снизить риски для других подземных металлических сооружений, обусловленные генерированием положительных постоянных блуждающих токов системой катодной защиты. Данное качество предлагаемого анодного заземления особенно актуально в городских условиях, а также на территории крупных промышленных объектов, характеризующихся повышенной плотностью подземных металлических сооружений.

Ключевые слова: анодное заземление, коррозия, почвенная коррозия, электрохимическая коррозия, электрохимическая защита от коррозии, катодная защита от коррозии, защита от наружной коррозии, активная защита от коррозии.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-116-128

OPTIMIZATION OF THE AMOUNT OF COKE FILLING USAGE IN CATHODIC PROTECTION SYSTEMS FOR AN ANODE GROUNDING MODEL IN THE FORM OF A HEMISPHERE

V.G. Kiselev, E.N. Ruzich, C.V. Chung

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

kis_vg@mail.ru, rouzith@mail.ru

Abstract: In this work, we calculated the optimal amount according to "annualized costs" criteria on the basis of model representations for the anodic grounding of the cathodic protection system in the form of a single hemisphere, which is located on the surface of the ground and contains coke backfilling. At the same time, calculations were made for a similar grounding, but without the use of coke filling, which allowed comparative analysis and calculation of their comparative economic efficiency, depending on the specific resistance of the soil. As a result of these calculations, we proposed a modernized anode ground with a normalized amount of coke filling, that has increased safety in comparison with the traditional product, since it allows to reduce

risks, caused by generation of positive DC stray currents of cathodic protection system, to other underground metal constructions. This quality of the proposed anode grounding is especially important in urban areas and at the territories of large industrial facilities characterized by an increased density of underground metal structures.

Keywords: *sacrificial anode, electrochemical corrosion, corrosion protection, active corrosion protection, cathodic protection, soil corrosion, protection against corrosion, cathodic protection against corrosion.*

Введение

Современное состояние топливно-энергетического комплекса Российской Федерации и коммунального хозяйства в целом характеризуется повышенной аварийностью подземных металлических коммуникаций (ПМК) и высокой степенью их износа, что требует значительных капитальных затрат на их реконструкцию и поддержание в работоспособном состоянии. В этом случае, как показывает практика, наибольшую опасность представляет наружная коррозия ПМК, для борьбы с которой используется целый комплекс антикоррозионных мероприятий, включающий, в том числе, и их катодную поляризацию, которая, особенно в условиях крупных городов и производственных площадок, связана со значительными капитальными и эксплуатационными затратами [1–5]. Кроме того, наблюдается явная интенсификация работ в области электрохимической защиты от коррозии под воздействием переменных блуждающих токов [6–10]. В связи с этим очевидно, что повышение эффективности использования активной антикоррозионной защиты подземных металлических трубопроводов (ПМТ) существенно уменьшает вложения как на сооружение установок катодной защиты, так и на их последующую эксплуатацию [11; 12] и поэтому может считаться приоритетным направлением развития данной технологии. Практика выработала достаточно эффективный способ снижения приведённых затрат на катодную защиту путём применения коксовой засыпки при сооружении анодных заземлений. Как правило, в этом случае положительный эффект достигается как за счёт продления срока службы анодов, так и за счёт снижения затрат на электроэнергию [13], необходимую для функционирования систем электрохимической защиты. Дополнительным фактором, работающим в направлении использования коксовой засыпки, особенно в городских условиях при наличии высокой плотности укладки ПМТ и других подземных металлических сооружений, является уменьшение зоны, опасной в отношении наличия блуждающих токов, в окрестностях анодного заземления. Рассмотрению двух последних вопросов, связанных с применением традиционных модельных представлений, используемых для описания анодного заземления, и посвящена данная статья.

Оптимизация объёма использования коксовой засыпки для модели анодного заземления в форме полусферы, расположенной на поверхности грунта

Рассмотрим простейший вариант катодной защиты подземного трубопровода (рис. 1), включающий преобразователь для катодной защиты 1, кабельные прокладки 2 и 3, анодное заземление 4 и собственно защищаемый металлический трубопровод 5, изолированный от окружающей среды при помощи диэлектрического, например полиэтиленового, покрытия 6. При этом все элементы системы, за исключением преобразователя и части изолированных кабельных прокладок, расположены в грунте 7, а диэлектрическое покрытие имеет такие дефекты 8, что металл трубопровода в их пределах непосредственно контактирует с окружающим его грунтом или грунтовым электролитом.

Примем, что анод для заземления установки катодной защиты (рис. 1 и 2) представляет собой одиночный электрод, выполненный из металла, например железа, в форме полусферы с радиусом r_0 , который расположен на поверхности грунта, как это

показано на рис. 2,а. Удельное сопротивление металла равняется ρ_m , а удельное сопротивление грунта соответственно ρ_g .

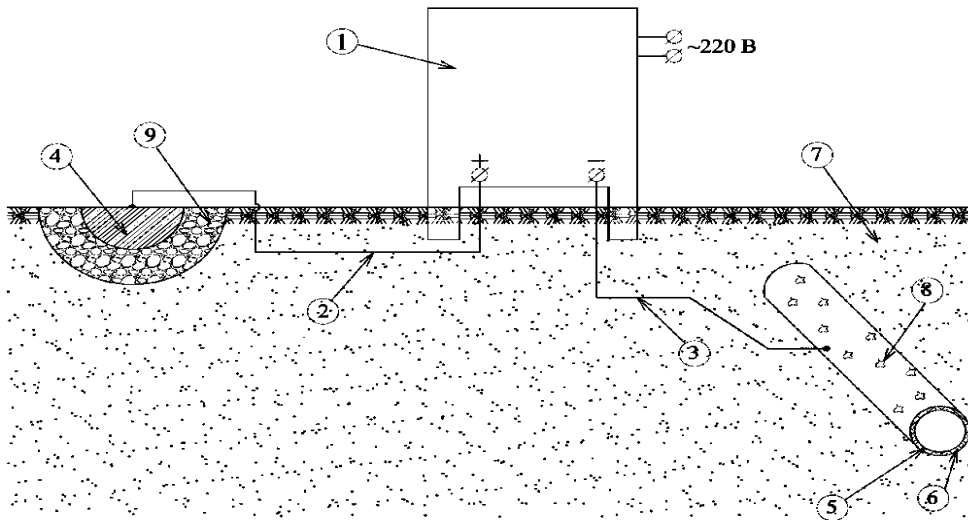


Рис. 1. Схема катодной защиты: 1 – катодная станция (преобразователь); 2, 3 – кабельные прокладки; 4 – анодное заземление; 5 – защищаемый металлический трубопровод; 6 – полиэтиленовое покрытие; 7 – грунт; 8 – дефект; 9 – коксовая засыпка

В силу того, что удельное сопротивление металла крайне мало и значительно меньше удельного сопротивления грунта, то, с одной стороны, можно считать, что поверхность металлической полусферы эквипотенциальна и равна потенциалу на её кабельном вводе, а с другой стороны – не учитывать сопротивление металла анода в дальнейших расчётах. Поэтому, при нахождении рассматриваемой модели в гомогенном грунте и при бесконечном удалении её от трубопровода, сопротивление растекания анодного заземления R_g будет определяться следующим выражением [14, стр. 436]:

$$R_g = \frac{\rho_g}{2\pi r_0}. \quad (1)$$

В свою очередь, если предположить, что анодное заземление находится при тех же самых условиях, в коксовой засыпке (грунт целиком заменён на коксовую засыпку, рис. 2,б), то его сопротивление растекания R_k будет определяться выражением, аналогичным предыдущему [14, с. 436], а именно:

$$R_k = \frac{\rho_k}{2\pi r_0}, \quad (2)$$

где ρ_k – удельное сопротивление коксовой засыпки.

Примем, что r – расстояние от центра анодного заземления (точка a) до некоторой точки (b) в грунте или коксовой засыпке (рис. 2,с и 2,д). В этом случае, учитывая симметрию объекта исследования, сопротивление слоя грунта от окончания радиус-вектора r (точка b) до точки грунта (c) бесконечно удалённой от анодного заземления $R_{gr\infty}$, будет определяться следующей формулой (рис. 2,с):

$$R_{gr\infty} = \frac{\rho_g}{2\pi r}. \quad (3)$$

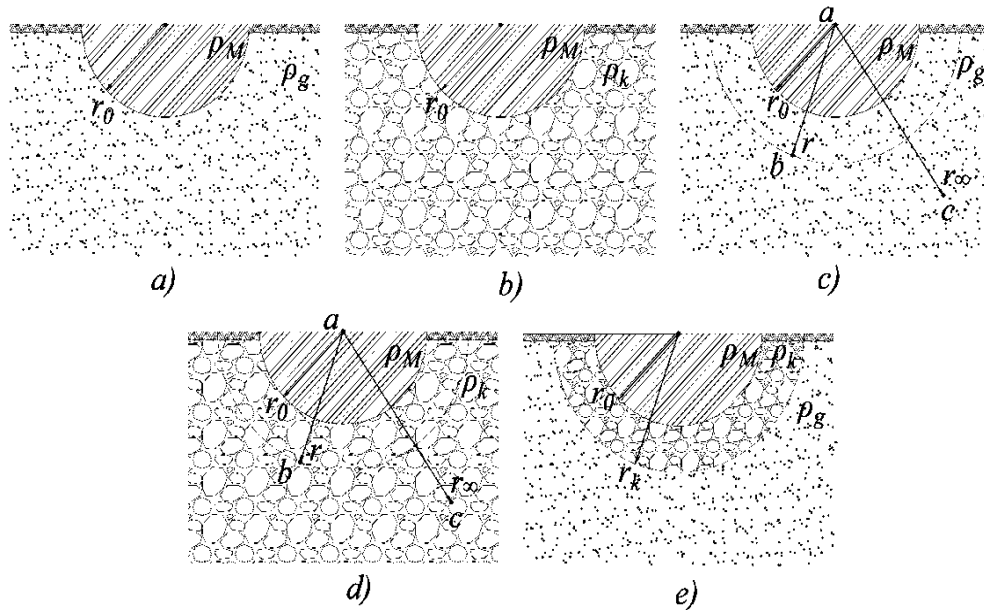


Рис. 2. Модель анодного заземления полусферической формы, расположенная на поверхности земли (грунта)

Аналогично, сопротивление слоя коксовой засыпки от окончания радиус-вектора r (точка b) до точки грунта, бесконечно удалённой от анодного заземления (точка c), в случае если грунт полностью заменён коксовой засыпкой (рис. 2,d), можно будет рассчитать, используя следующее математическое выражение:

$$R_{kr\infty} = \frac{\rho_k}{2\pi r}. \quad (4)$$

Из формул (1) и (3) следует, что сопротивление слоя грунта, находящегося между анодным заземлением и полусферой с радиусом r (рис. 2,c), будет определяться соотношением

$$R_{gr_0r} = \frac{\rho_g}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right). \quad (5)$$

Аналогично, из формул (2) и (4) следует, что сопротивление слоя коксовой засыпки, находящегося между анодным заземлением и полусферой с радиусом r , в случае, если грунт в системе полностью заменён коксовой засыпкой (рис. 2,d), можно рассчитать с использованием математического выражения

$$R_{kr_0r} = \frac{\rho_k}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right). \quad (6)$$

Из соотношений (5) и (6), путём вычитания, получаем формулу для расчета изменения величины сопротивления анодного заземления ΔR при замене слоя грунта на коксовую засыпку с радиусом, изменяющимся от r_0 до значения r_k (рис. 2,e). Таким образом, общее сопротивление грунта R_g , определяемое формулой (1), уменьшится на величину ΔR :

$$\Delta R = R_{gr_0r} - R_{kr_0r}. \quad (7)$$

При подстановке в правую часть последнего выражения значений соответствующих величин из предыдущих формул, получаем:

$$\Delta R = \frac{(\rho_g - \rho_k)}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right). \quad (8)$$

Использование последнего соотношения совместно с уравнением (1), определяющим сопротивление анодного заземления выбранной нами формы и расположения в грунте, позволяет получить формулу для расчёта сопротивления анодного заземления, расположенного в комбинированной системе: коксовая засыпка – грунт. В этом случае коксовая засыпка расположена в полусфере, ограниченной, соответственно, радиус-векторами r_0 и r_k , за пределами радиус-вектора r_k вплоть до бесконечности находится грунт (рис. 2,е). Сопротивление растекания анодного заземления выбранной нами формы и сочетания коксовой засыпки и грунта R_{kg} будет определяться следующим соотношением:

$$R_{kg} = R_g - \Delta R. \quad (9)$$

При подстановке в правую часть последнего выражения значений соответствующих величин из предыдущих формул, получаем формулу, характеризующую сопротивление растекания анодного заземления при наличии коксовой засыпки:

$$R_{kg} = \frac{\rho_g}{2\pi r_k} + \frac{\rho_k}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right). \quad (10)$$

Известно [15, с. 82], что значение катодного защитного тока I_0 , полностью определяется параметрами, характеризующими защищаемое сооружение и окружающую его среду. В этом случае, исходя из схемы катодной защиты (рис. 1), очевидно, что при любых изменениях характеристик анодного заземления величина I_0 должна оставаться постоянной. Это обстоятельство позволяет нам определить потери мощности на анодном заземлении при изменении его рабочих характеристик.

В этом случае годовые расходы на электроэнергию C_g , которые обусловлены электрическим сопротивлением анодного заземления, находящегося в грунте, с учётом формулы Джоуля-Ленца будут определяться следующим выражением:

$$C_g = KktI_0^2 R_g, \quad (11)$$

где K – коэффициент, характеризующий коэффициент полезного действия преобразователя; так, например, при КПД равном 50% величина данного коэффициента будет равна двум; k – стоимость электроэнергии (примем её равной 4,00 руб/(кВт·ч)); t – количество часов в году (8760); I_0 – общий защитный ток, текущий через анодное заземление.

Точно так же расходы на электроэнергию C_k , которые обусловлены электрическим сопротивлением анодного заземления, находящегося в коксовой засыпке, будут определяться формулой, аналогичной предыдущему математическому выражению:

$$C_k = KktI_0^2 R_k. \quad (12)$$

Сочетание последних трёх уравнений позволяет записать соотношение, определяющее расход электроэнергии на анодном заземлении, находящемся в комбинированном грунте, с параметрами, определёнными нами ранее, и состоящем из коксовой засыпки и собственно грунта:

$$C_{kg} = KktI_0^2 R_{kg}. \quad (13)$$

Вместе с тем, общий экономический эффект практически любого мероприятия в области строительства, в том числе и сооружения объектов электрохимической защиты, как правило, принято оценивать с использованием понятия «приведённый годовой эффект», обычно определяемый следующим соотношением:

$$P = \frac{K_0}{T} + E_a, \quad (14)$$

где P – приведённые годовые затраты в рублях; K_0 – капитальные затраты на сооружение объекта в рублях; T – срок службы объекта (количество лет); E_a – годовые эксплуатационные затраты в рублях.

Следует отметить, что использование коксовой засыпки при сооружении анодного заземления, помимо собственно уменьшения потерь мощности на нём, приводит к ряду других положительных эффектов. Так, например, в этом случае [14, стр. 185]: увеличивается срок службы анодов; уменьшается, в силу существенного роста реакционной поверхности, электрохимическое перенапряжение на анодном заземлении; снижается необходимая установочная мощность преобразователя катодной защиты и, по всей видимости, несколько снижаются затраты на профилактическое обслуживание установки катодной защиты. Однако рассмотрение этих вопросов явно выходит за рамки заявленной темы, поэтому в данной работе мы на них останавливаться не будем.

Как следует из формулы (14), общий экономический эффект, обусловленный экономией электроэнергии при использовании коксовой засыпки, несколько снижается за счёт стоимости кокса и дополнительных затрат на его доставку и укладку. В строительстве при грубых оценках стоимости работ принято считать, что стоимость доставки и использования материала равняется его цене. Воспользуемся этим широко распространённым приёмом для оценки работ по укладке кокса при строительстве анодного заземления. В этом случае для комплекса работ по укладке коксовой засыпки, включая и стоимость материалов K_k , получаем следующее выражение:

$$K_k = k_a a D \frac{2\pi}{3} (r_k^3 - r_0^3), \quad (15)$$

где k_a – коэффициент, характеризующий затраты на доставку и укладку коксовой засыпки, по отношению к стоимости самого материала; например, при стоимости материала, равной стоимости работ по его доставке и укладке, он будет равен двум; a – стоимость в рублях единицы веса коксовой засыпки, руб/кг; D – плотность коксовой засыпки, кг/м³.

В таком случае общие капитальные затраты на сооружение анодного заземления K_0 , входящие в формулу (14), будут представлены следующим выражением

$$K_0 = K_a + K_k, \quad (16)$$

где K_a – капитальные затраты, включающие стоимость, доставку и укладку собственно жертвенного анода, которые в нашем случае по условиям задачи неизменны.

Для расчёта годовых приведённых затрат P в соответствии с формулой (14) необходимо определить годовые приведённые капитальные затраты K_0/T и годовые эксплуатационные затраты E_a . Отметим, что величина K_0 , исходя из соотношений (15) и (16), является возрастающей функцией с пределами изменения от некоторой константы до бесконечности и областью определения от r_0 до бесконечности. В то же время функция C_{kg} , с той же самой областью определения, в соответствии с соотношением (13) является убывающей от некоторой константы до нуля. Учитывая, что мы при анализе эксплуатационных затрат анодного заземления учитываем только затраты на электроэнергию, то можно принять что $C_{kg} \approx E_a$. Таким образом, исходя из физической сущности функций K_0 и C_{kg} (и та, и другая зависят от радиус-вектора r) и учитывая, что величина срока службы анодного заземления T , по определению, больше или равна нулю, можно утверждать, что приведённые затраты P , определяемые соотношением (14), имеют некоторое минимальное значение при изменении величины r_k . Для нахождения его воспользуемся тем обстоятельством, что для непрерывных функций в точке экстремума их производная равна нулю. Подставим в соотношение (14) полученные нами значения величин E_a и K_0 , тогда получим следующее выражение:

$$P = k_a a D \frac{2\pi}{3T} (r_k^3 - r_0^3) + \frac{K_a}{T} + K k t I_0^2 \left(\frac{\rho_g}{2\pi r_k} + \frac{\rho_k}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right) \right). \quad (17)$$

Продифференцируем последнее выражение по r_k и приравняем полученное соотношение к нулю. После разрешения его относительно r_k получим формулу для вычисления оптимальной величины радиус-вектора r_{kr} :

$$r_{kr} = \sqrt[4]{\frac{(\rho_g - \rho_k) k K t T I_0^2}{4\pi^2 a k_a D}}, \quad (18)$$

где r_{kr} — значение вектора r_k , отвечающее оптимальному, в смысле уравнения (14), выбору параметров коксовой засыпки.

Подставим в данную формулу вместо буквенных обозначений конкретные наиболее распространённые значения характеризующих их численных величин ($\rho_k = 0,2$ Ом·м; $k = 4$ руб/(кВт·ч); $K = 2$; $t = 8760$ ч; $T = 10$ лет; $I_0 = 1$ А; $a = 40$ руб/кг; $k_a = 2$; $r_0 = 0,15$ м; $D = 800$ кг/м³; $K_a = 20\,000$ руб.) и проведём вычисления оптимальной «толщины» коксовой засыпки как функции удельного сопротивления грунта. Значения удельного сопротивления грунта ρ_g будем варьировать в пределах от 10 Ом·м (влажная глина; песок, сильно увлажнённый грунтовыми водами) до 100 Ом·м (суглинок полутвёрдый; умеренно увлажнённый песок). Результаты вычисления представим в табличной (табл. 1) и графической (рис. 3) форме.

Таблица 1

Зависимость основных характеристик одиночного полусферического анодного заземления с оптимальными параметрами коксовой засыпки от удельного сопротивления грунта ρ_g

ρ_g , Ом·м	$r_{kr}(r_r)$, м	R_{ka} , Ом	K_a , руб.	K_k , руб.	E_a , руб.	P , руб./год
10	0,228	7,04	20 000	1144	494	2608
20	0,272	11,79	20 000	2253	826	3052
30	0,302	15,95	20 000	3223	1117	3440
40	0,324	19,76	20 000	4114	1385	3796
50	0,343	23,34	20 000	4950	1636	4130
60	0,359	26,74	20 000	5745	1874	4448
70	0,373	30,00	20 000	6507	2103	4753
80	0,386	33,15	20 000	7242	2323	5047
90	0,397	36,20	20 000	7954	2537	5332
100	0,408	39,16	20 000	8647	2745	5609

В качестве базы для сравнения рассмотрим вариант анодного заземления, в котором коксовая засыпка отсутствует. В этом случае вместо формулы (13) для расчёта годовых эксплуатационных затрат на анодном заземлении без коксовой засыпки E_{ag} необходимо использовать модернизированную формулу (11), которую мы обозначим как (11*):

$$E_{ag} \approx C_g = K k t I_0^2 R_g. \quad (11*)$$

В свою очередь, для расчёта капитальных затрат вместо формулы (16) нужно использовать следующее соотношение:

$$K_0 = K_a. \quad (16*)$$

Проведём вычисления приведённых затрат для анодного заземления, расположенного в грунте P_g с использованием модернизированной формулы (14), обозначив её через (14*):

$$P_g = \frac{K_0}{T} + E_{ag}, \quad (14*)$$

Результаты вычислений представим в табличной форме (табл. 2), а в графической форме для сравнения с приведёнными затратами в случае наличия коксовой засыпки покажем на рис. 3.

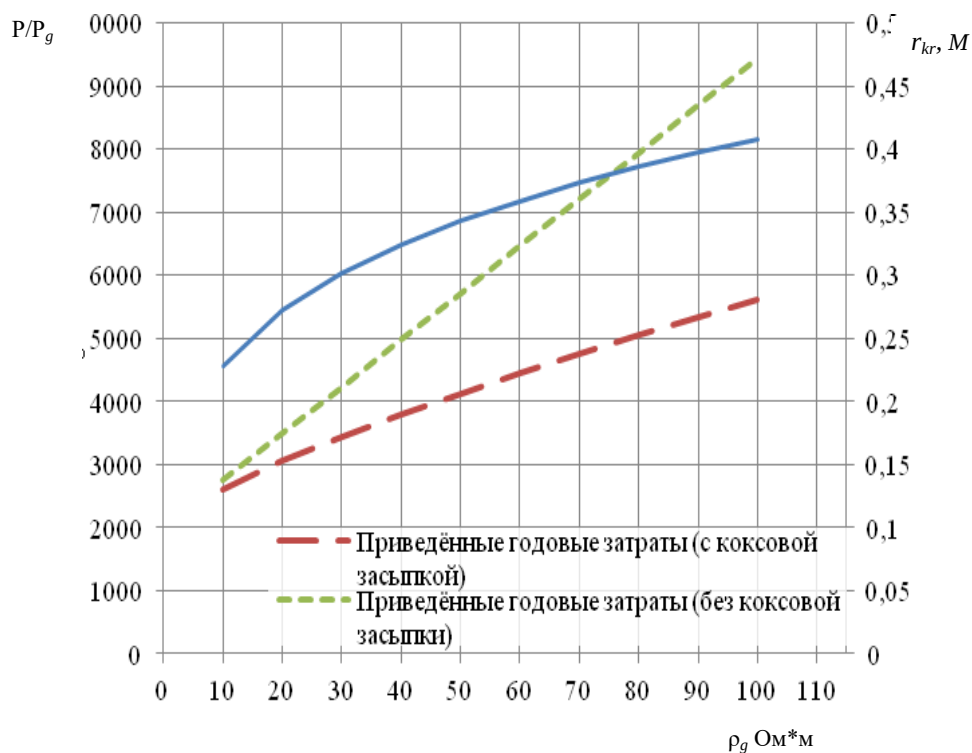


Рис. 3. Зависимость приведенных годовых затрат P и расчетного оптимального радиуса коксовой засыпки (r_{kr}) от удельного сопротивления грунта ρ_g

Таблица 2

Зависимость основных характеристик одиночного полусферического анодного заземления без коксовой засыпки от удельного сопротивления грунта ρ_g

ρ_g , Ом*м	K_a , руб.	E_{aq} , руб./год	P_a , руб./год
10	20 000	744	2744
20	20 000	1488	3488
30	20 000	2232	4232
40	20 000	2976	4976
50	20 000	3720	5720
60	20 000	4464	6464
70	20 000	5208	7208
80	20 000	5952	7952
90	20 000	6696	8696
100	20 000	7439	9439

Простое сравнение табличных данных и графических материалов показывает существенное снижение приведенных затрат при использовании оптимальных параметров коксовой засыпки в процессе сооружения анодного заземления и увеличение данного полезного эффекта с ростом удельного сопротивления грунта.

Влияние объёма использования коксовой засыпки для модели анодного заземления в форме полусферы, расположенной на поверхности грунта, на размеры зоны, опасной в отношении блуждающих токов, исходящих от анодного заземления

Примем, как и ранее, что r – расстояние от центра анодного заземления до некоторой точки в грунте или коксовой засыпке (рис. 2). В этом случае, в соответствии с монографией [14, с. 432 и 436], потенциал анодного заземления φ_{gr_0} , измеренный относительно бесконечно удалённой земли, будет определяться формулой

$$\varphi_{gr_0} = \frac{I_0 \rho_g}{2\pi r_0}. \quad (19)$$

В тоже время, ориентируясь на тот же источник [14, с. 432, 436], потенциал грунта φ_{gr} , расположенного на расстоянии r от центра анодного заземления, может определяться и следующим математическим выражением:

$$\varphi_{gr} = r_0 \frac{\varphi_{gr_0}}{r}. \quad (20)$$

После подстановки в последнюю формулу значения величины φ_{gr_0} из соотношения (19) получаем соотношение

$$\varphi_{gr} = \frac{I_0 \rho_g}{2\pi r}. \quad (21)$$

В соответствии с практическим критерием [15, стр. 171] оценки опасности в отношении блуждающих токов, исходящих от анодного заземления, потенциал грунта относительно бесконечно удалённой земли, равный +0,5 вольта и менее, признаётся не опасным. Данное обстоятельство позволяет рассчитать с использованием формулы (21) размеры окружности с центром, в котором находится анодное заземление, опасной в отношении блуждающих токов. После подстановки в формулу (21) вместо φ_{gr} его значения, равного +0,5 вольт, и проведения соответствующих преобразований получаем для вычисления границы опасной зоны, очерченной на поверхности грунта радиус-вектором r_{gro} , следующее выражение:

$$r_{gro} = \frac{I_0 \rho_g}{\pi}. \quad (22)$$

При использовании коксовой засыпки в части полусферы, ограниченной соответственно радиус-векторами r_0 и r_k , за пределами радиус-вектора r_k , вплоть до бесконечности, будет находиться грунт. В этом случае величину R_{kg} , определяющую общее сопротивление анодного заземления, можно будет рассчитать с использованием формулы (10). В соответствии с законом Ома и уравнением (10), при выбранных нами ранее параметрах, характеризующих анодное заземление, грунт и коксовую засыпку, значение потенциала анодного заземления $\varphi_{kg r_0}$ относительно бесконечно удалённой земли при наличии коксовой засыпки и грунта будет определяться соотношением

$$\varphi_{kg r_0} = I_0 \left[\frac{\rho_g}{2\pi r_k} + \frac{\rho_k}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right) \right]. \quad (23)$$

Для нахождения потенциала грунта φ_{kgr} , расположенного на расстоянии r от центра анодного заземления, в случае наличия только коксовой засыпки перепишем выражение (20) следующим образом:

$$\varphi_{kgr} = r_0 \frac{\varphi_{kg r_0}}{r}. \quad (20^*)$$

Подставив значение потенциала анодного заземления $\varphi_{kg r_0}$ из уравнения (23) в (20*), получим:

$$\varphi_{kg r} = \frac{r_0 I_0}{2\pi} \left[\frac{\rho_g}{r_k} + \rho_k \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right) \right]. \quad (24)$$

Учитывая, что в соответствии с практическим критерием опасности анодного заземления в отношении блуждающих токов для подземных металлических сооружений потенциал $\varphi_{kg r}$ должен быть равен +0,5 вольта, величину безопасного радиуса r_B можно вычислить из последней формулы:

$$r_B = \frac{r_0 I_0}{\pi} \left[\frac{\rho_g}{r_k} + \rho_k \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_k} \right) \right]. \quad (25)$$

Однако в ряде случаев более информативной характеристикой, необходимой для анализа данного явления, является определение величины r_{BO} , которая представляет собой частный случай величины r_B , вычисленной при оптимальном, в смысле формулы (18), значении величины радиуса коксовой засыпки. Такой подход позволяет несколько видоизменить формулу (25) и представить её в следующем виде:

$$r_{BO} = \frac{r_0 I_0}{\pi} \left[\frac{\rho_g}{r_{kr}} + \rho_k \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_{kr}} \right) \right]. \quad (26)$$

Проведём вычисление величины r_{BO} как функции удельного сопротивления грунта, воспользовавшись формулой (26) и табл. 1. В качестве базы для сравнения используем вариант анодного заземления без коксовой засыпки (формула 22), которая характеризуется радиус-вектором r_{gro} . В таком случае уменьшение величины опасной зоны, очерченной радиус-вектором, исходящим из центра одиночного анодного заземления, составит величину Δr и будет определяться следующей формулой

$$\Delta r = r_{gro} - r_{BO}. \quad (27)$$

Однако зачастую более информативной характеристикой, необходимой для анализа данного явления, является выигрыш в площади, безопасной в отношении блуждающих токов ΔS , связанный с применением коксовой засыпки для анодного заземления, который можно вычислить с использованием формулы, полученной на основании формулы для расчёта площади кругового кольца:

$$\Delta S = \pi \left(\frac{I_0 \rho_g}{\pi} \right)^2 - \pi \left(\frac{r_0 I_0}{\pi} \left[\frac{\rho_g}{r_{kr}} + \rho_k \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_{kr}} \right) \right] \right)^2. \quad (28)$$

Проведём данные вычисления, а их результаты внесём в табл. 3 и представим в графической форме (рис. 4).

Таблица 3

Зависимость характеристик зоны опасной в отношении блуждающих токов одиночного полусферического анодного заземления от удельного сопротивления грунта ρ_a

ρ_a , Ом·м	r_{kr} , м	r_{gro} , м	r_{BO} , м	Δr , м	ΔS , м ²
10	0,228	3,18	2,11	1,07	18
20	0,272	6,37	3,54	2,83	88
30	0,302	9,55	4,78	4,77	215
40	0,324	12,74	5,93	6,81	399
50	0,343	15,92	7,00	8,92	642
60	0,359	19,11	8,02	11,09	944
70	0,373	22,29	9,00	13,29	1306
80	0,386	25,48	9,94	15,53	1728
90	0,397	28,66	10,86	17,80	2209
100	0,408	31,85	11,75	20,10	2751

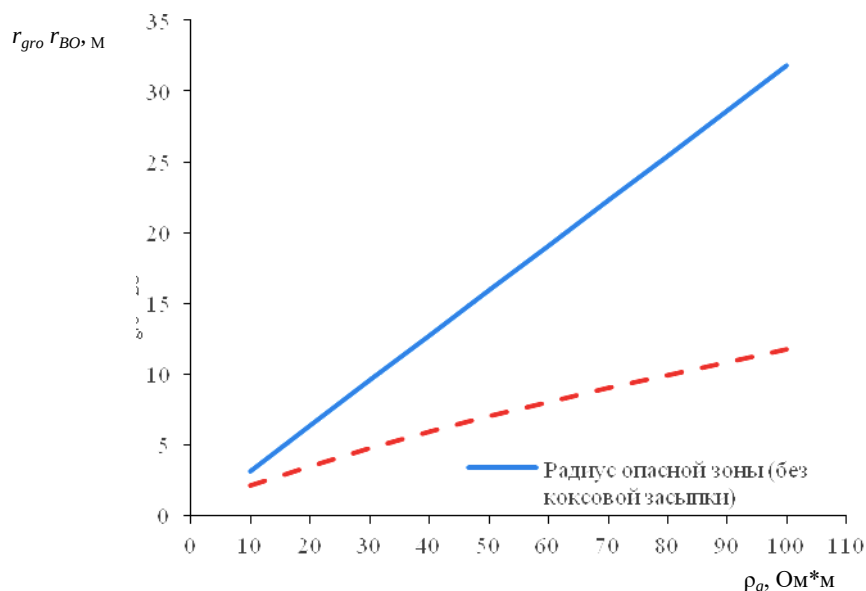


Рис. 4. Зависимость радиуса опасной зоны в случае наличия (r_{bo}) и отсутствия (r_{gro}) коксового наполнителя от удельного сопротивления грунта (ρ_g)

Обсуждение результатов и выводы

В работе на базе модельных представлений для анодного заземления системы катодной защиты в форме одиночной полусферы, которая расположена на поверхности грунта, и наличия коксовой засыпки рассчитано оптимальное, в смысле критерия «годовые приведённые затраты», количество кокса. Одновременно произведён расчет для аналогичного заземления, но без использования коксовой засыпки, что позволило провести их сравнительный анализ и рассчитать сравнительную экономическую эффективность в зависимости от удельного сопротивления грунта. В результате данных расчётов предложено модернизированное анодное заземление с нормированным количеством коксовой засыпки, которое обладает повышенной безопасностью по сравнению с традиционным изделием, так как позволяет снизить риски, обусловленные генерированием положительных постоянных блуждающих токов системой катодной защиты, для других подземных металлических сооружений. Данное качество предлагаемого анодного заземления особенно актуально в городских условиях, а также на территории крупных промышленных объектов, характеризующихся повышенной плотностью подземных металлических сооружений.

В результате проведённых исследований можно сделать следующие **выводы**.

1. Предложена методика расчёта оптимального количества кокса для полусферической модели анодного заземления, гарантирующая снижение приведённых затрат и оценку величины данного снижения при сооружении и последующей эксплуатации анодного заземления системы катодной защиты при различных значениях удельного сопротивления грунта.
2. Предложена методика расчёта снижения зоны, опасной в отношении положительных блуждающих токов для полусферической модели анодного заземления, работающей при оптимальных параметрах в отношении приведённых годовых затрат при различных значениях удельного сопротивления грунта.

Литература

1. Сурис М.А., Липовских В.М. Защита трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 2003. 216 с.
2. Родичев Л.В. Снижение ресурса эксплуатационной безопасности тепловых сетей и методы их защиты. СПб.: Издательство СПбГПУ, 2002. 138 с.
3. Родичев Л.В. Эффективность транспорта тепловой энергии. СПб.: Издательство ООО «Дом Шуан», 2006. 448 с.
4. Мурадов А.В., Исмаилова Г.Г., Хасанов А.А. Некоторые особенности реализации совместной электрической защиты // Нефть, газ и бизнес. 2014. № 4. С. 61–63.
5. Мурадов А.В., Исмаилова Г.Г., Хасанов А.А. Совместная защита двух подземных сооружений // Нефть, газ и бизнес. 2012. № 4. С. 44–46.
6. W. v. Baeckmann, Jakob R. Korrosionsschutz von Gas-und Wasserrohrleitungen. Vulkan-Verlag Essen, 1995, 82 s.
7. Ulrich Bette, Christoph Bornemann. Ergebnisse von Laboruntersuchungen zur Wechselstromkorrosion. 3R International. 2008. № 11. P. 641–645.
8. Ulrich Bette. Ergebnisse des Feldversuchens an einer durch Bahnwechselstrom beeinflussten Rohrleitung. 3R International. 2016. № 6. P. 40–45.
9. Markus Büchler, David Joos. Wechselstromkorrosion an kathodisch geschützten Rohrleitungen. 3R International. 2016. № 6. P. 46–52.
10. Marius Fischer, Arnold Weber. Alternative Schutzstromversorgung in Verteilnetzen. 3R International, 2016, № 6, P. 53–57.
11. Киселев В.Г., Калютик А.А. Влияние покрывного слоя подземных металлических сооружений на коэффициент полезного действия катодной защиты // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 27–36.
12. Киселев В.Г., Калютик А.А. Влияние удельного сопротивления грунта в зоне расположения подземного трубопровода на коэффициент полезного действия катодной защиты // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 11–12. С. 48–55.
13. Киселев В. Г. Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 4–1 (183). С. 93–99.
14. W. von Baeckmann und W. Schwenk. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. Verlag Chemie, 1980. 465 p.
15. Ulrich Bette, Wolfgang Vesper. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. Vulkan-Verlag Essen, 2005. 367 p.

Авторы публикации

Киселев Владимир Геннадьевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ). E-mail: kis_vg@mail.ru.

Рузич Евгений Николаевич — аспирант кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ). E-mail: rouzith@mail.ru.

Чан Ван Чунг — студент кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ). E-mail: tranvan_trung551987@yahoo.com.

References

1. Suris M.A., Lipovskikh V.M. Zashchita truboprovodov teplovykh setei ot naruzhnoi korrozii. M.: Energoatomizdat, 2003. 216 s.

2. Rodichev L.V. Snizhenie resursa ekspluatatsionnoi bezopasnosti teplovykh setei i metody ikh zashchity. SPb.: Izdatel'stvo SPbGPU, 2002. 138 s.
3. Rodichev L.V. Effektivnost' transporta teplovoi energii. SPb.: Izdatel'stvo OOO «Dom Shuan», 2006. 448 s.
4. Muradov, A.V., Ismailova G.G., Khasanov A.A. Nekotorye osobennosti realizatsii sovmestnoi elektricheskoi zashchity // Neft', gaz i biznes. 2014. № 4. S. 61–63.
5. Muradov A.V., Ismailova G.G., Khasanov A.A. Sovmestnaya zashchita dvukh podzemnykh sooruzhenii // Neft', gaz i biznes. 2012. № 4. S. 44–46.
6. W. v. Baeckmann, Jakob R. Korrosionsschutz von Gas-und Wasserrohrleitungen. Vulkan-Verlag Essen, 1995, 82 s.
7. Ulrich Bette, Christoph Bornemann. Ergebnisse von Laboruntersuchungen zur Wechselstromkorrosion. 3R International, 2008. № 11, P. 641–645.
8. Ulrich Bette. Ergebnisse des Feldversuchens an einer durch Bahnwechselstrom beeinflussten Rohrleitung. 3R International, 2016. № 6, P. 40–45.
9. Markus Büchler, David Joos. Wechselstromkorrosion an kathodisch geschützten Rohrleitungen. 3R International, 2016, № 6, P. 46–52.
10. Marius Fischer, Arnold Weber. Alternative Schutzstromversorgung in Verteilnetzen. 3R International, 2016, № 6, P. 53–57.
11. Kiselev V.G., Kalyutik A.A. Vliyanie pokryvnogo sloya podzemnykh metallicheskich sooruzhenii na koeffitsient poleznogo deistviya katodnoi zashchity // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2016. № 5–6. S. 27–36.
12. Kiselev V.G., Kalyutik A.A. Vliyanie udel'nogo soprotivleniya grunta v zone raspolozheniya podzemnogo truboprovoda na koeffitsient poleznogo deistviya katodnoi zashchity // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2015. № 11–12. S. 48–55.
13. Kiselev V. G. Osnovnye printsiipy proektirovaniya katodnoi zashchity podzemnykh metallicheskich sooruzhenii // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. 2013. № 4–1 (183). S. 93–99.
14. W. von Baeckmann und W. Schwenk. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. Verlag Chemie, 1980, 465 p.
15. Ulrich Bette, Wolfgang Vesper. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. Vulkan-Verlag Essen, 2005. 367 p.

Authors of the publication

Kiselev Vladimir Gennad'evich — the doctor of science (Tech.), professor of the department “Nuclear and Heat Power Engineering”, Peter the Great. St. Petersburg Polytechnic University.

Ruzich Evgenij Nikolaevich — PhD student of the department “Nuclear and Heat Engineering”, Peter the Great. St. Petersburg Polytechnic University.

Chan Van Chung – student of the department “Nuclear and Heat Power Engineering”, Peter the Great. St. Petersburg Polytechnic University.

Поступила в редакцию

11 января 2018 года.

УДК 621.311.22

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
КОНЦЕНТРАЦИИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В АТМОСФЕРЕ
РАЙОНА РАСПОЛОЖЕНИЯ КОТЕЛЬНОЙ,
СЖИГАЮЩЕЙ НЕПРОЕКТНОЕ ТОПЛИВО**

М.С. Иваницкий

mseiv@yandex.ru

**Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»
в г. Волжском, Россия**

Резюме: В статье выполнено моделирование распределения концентрации твердых (золовых) частиц, образующихся от сжигания нефтяного кокса, в атмосфере прилегающих к котельной территорий при неблагоприятных метеорологических условиях. Установлено влияние класса устойчивости атмосферы на эффективность рассеивания токсичных выбросов. Определены основные климатические характеристики, обеспечивающие санитарно-гигиенические параметры состояния атмосферы воздуха. Показано значительное влияние на процессы рассеивания твердых частиц опасных скоростей ветра в слое атмосферы и рельефа подстилающей поверхности.

Ключевые слова: рассеивание, твердые частицы, нефтяной кокс, котлы системы теплоснабжения.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-129-135

**STATISTICAL MODELING OF DISTRIBUTION OF CONCENTRATION OF
SOLID PARTICLES IN THE ATMOSPHERE DISTRICT LOCATION BOILER,
COMBUSTING NON-PROJECT FUEL**

M.S. Ivanickiy

mseiv@yandex.ru

Branch of the National Research University "MEI" in Volzhsky, Russia

Abstract: In the article modeling distribution of concentration of solid (ash) particles formed from burning petroleum coke, in the atmosphere adjacent to the boiler room of the territories in adverse weather conditions. Established the influence of stability class of the atmosphere on the effectiveness of the dispersion of toxic emissions. Identifies the main climatic characteristics of providing sanitary-hygienic conditions of the atmospheric air. A significant impact on the processes of dispersion of solid particles of dangerous wind speeds in the layer of the atmosphere and topography of the underlying surface.

Keywords: dispersion, a solid particle, petroleum coke, the boilers of the heating system.

Введение

Сжигание в котлах твердого топлива провоцирует образование в продуктах сгорания сажистых (золовых) частиц. Наибольшую опасность в гетерогенных выбросах представляют частицы размером 2,5 и 10 мкм (*particulate matter*), оказывающие

существенное воздействие на здоровье человека. Распределение таких мелких примесей в воздухе атмосферы в зависимости от параметров окружающей среды крайне неоднородное. Интенсивность распределения примесей определяется: величиной массового выброса от источника негативного влияния, классом устойчивости (неустойчивости) [1–3]; турбулентной диффузией компонентов в приземной и пограничных слоях атмосферы. Применение непроектных топлив, например нефтяного кокса, для получения пара в котельных представляет возможность утилизации этого продукта вследствие значимых объемов производства и накопления на нефтеперерабатывающих заводах, например ООО «ЛУКОЙЛ-Волгограднефтепереработка», снижения себестоимости приготовления перегретого пара. Нефтяной кокс на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-Волгограднефтепереработка» получают коксованием крекинговых остатков при средней температуре процесса равной 490°C.

Паровой котел КЕ-10-14С, входящий в состав котельной, предназначен для слоевого сжигания твердого топлива. Паровая производительность котла 2,78 кг/с. Температура перегретого пара на выходе из котла 225°C, давление 1,4 МПа. Котел КЕ-10-14С оборудован системой очистки конвективных поверхностей нагрева от сажистых и коксовых частиц [1], образующихся в результате химического и механического недожога топлива.

Технологическое использование нефтяного кокса в котельной предусматривает предварительную подготовку топлива к сжиганию, которая заключается в его измельчении до однородного фракционного состава для уменьшения механической неполноты сгорания. Отметим, что при содержании углерода в составе нефтяного кокса до 92–95% теплотворная способность топлива составляет 32–35 МДж/кг, т.е. сравнима с тепловым эффектом от горения некоторых видов природного газа. Дополнительные затраты электрической энергии на дробление нефтяного кокса способствуют росту собственных нужд котельной. При этом высокая теплотворная способность нефтяного кокса приведет к снижению топливопотребления по сравнению с ранее используемым каменным углем, что в целом сократит удельные капитальные затраты в производство пара и улучшит эксплуатационные экологические показатели котельной.

Численное исследование и моделирование

На основе дифференциального уравнения турбулентной диффузии в [2] получено выражение для определения концентрации примеси над поверхностью Земли в виде

$$C = \frac{M}{4\pi Kr} \exp\left(-\frac{u}{2K}(r-x)\right), \quad (1)$$

где M – массовый выброс вещества, г/с; u – средняя скорость перемещения примеси по направлению X , м/с; K – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; r – расстояние до точки пространства, в которой рассчитывается концентрация, м; X – проекция расстояния r на ось X , направленную по ветру, м.

Вследствие распространения примеси над поверхностью Земли [2] и слабого взаимодействия с ней, примесь турбулентными потоками рассеивается в атмосфере.

Принято, что поэтому турбулентный вихрь у поверхности Земли незначителен:

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow 0.$$

Для вариантов, отображающих возможное взаимодействие примеси с поверхностью вводится некоторая постоянная, характеризующая интенсивность реагирования с подстилающей поверхностью. Установлено, что в таких условиях часть примеси возвращается в атмосферу после отражения от подстилающей поверхности. В работе рассмотрены равновесное E и неустойчивое D состояния атмосферы. Описание

статистического метода моделирования переноса примесей в атмосфере с учетом турбулентной диффузии и неоднородностей ветрового воздействия представлено в [2].

Предполагая, что линейные размеры дымовой трубы $\Delta y, \Delta z$ малы по сравнению с x , выражение для расчета концентрации примеси с учетом $\Delta z \rightarrow 0$, $r \approx x$, можно записать в виде зависимости

$$C = \frac{M}{2\pi Kx} \exp\left(-\frac{uH^2}{4Kx}\right), \quad (2)$$

где H – эффективная высота дымовой трубы, м.

Характер изменения скорости ветра с высотой [2] описывается уравнением

$$u = u_{z1} \frac{\lg \frac{z}{z_0}}{\lg \frac{z_1}{z_0}}, \quad (3)$$

где u_{z1} – скорость ветра на высоте расположения флюгера, м/с; u – текущее значение скорости ветра, м/с; z_1 – высота расположения оси флюгера, м; z_0 – шероховатость подстилающей поверхности, м.

В таблице представлены химический состав и характеристики нефтяного кокса.

Таблица

Химический состав нефтяного кокса						
Марка, класс / состав на рабочую массу, %						
Кокс нефтяной						
W=3	A=0,8	S=1,5	C=92,0	H=2,5	N=0,2	$Q^r = 34,247 \text{ МДж/кг}$

Параметры котельной установки и гетерогенных выбросов, принятые в процессе моделирования распределения концентрации золовых частиц в слоях атмосферы [4–10]: механический недожог равен $q_4 = 3\%$; максимальный выброс твердых частиц $777,6 \text{ кг/ч}$; коэффициент полезного действия котлоагрегата 85% ; скорость выхода дымовых газов из устья трубы $\omega_0 = 5,53 \text{ м/с}$; температура дымовых газов 180°C ; высота дымовой трубы 30 м ; диаметр устья 1 м .

На рис. 1 и 2 показаны результаты численного моделирования процессов распределения твердых частиц в атмосфере территорий, прилегающих к котельной, при различных условиях состояния устойчивости атмосферы (E и D), скорости ветра, величины коэффициента турбулентной диффузии. Расчет основных параметров среды и пространственных распределений концентраций примесей выполнен в соответствии с рекомендациями [2].

График изменения приземной концентрации твердых частиц в санитарно-защитной зоне котельной, сжигающей нефтяной кокс в котлах КЕ-10-14 С, показан на рис. 1. Точки на рис. 1–3 показывают расчетные значения, полученные в результате численных экспериментов.

Анализ рис. 1 показывает, что минимальные значения потока ветра обеспечивают рассеивание на уровне $0,24 \text{ ПДК}$ на расстоянии $X_M = 158,85 \text{ м}$ от котельной. В результате дальнейшего разбавления гетерогенных примесей в воздухе их концентрация снижается до $0,105 \text{ мг/м}^3$. Рассеивание выбросов твердых частиц при опасной скорости ветра $u_m = 10 \text{ м/с}$ определяет минимальное содержание золовых примесей в воздухе атмосферы для $X_M = 100 \text{ м}$, равное $2,62 \cdot 10^{-13} \text{ мг/м}^3$. Для $X_M = 200 \text{ м}$ определена максимальная приземная концентрация твердых частиц, соответствующая $1,68 \cdot 10^{-7} \text{ мг/м}^3$.

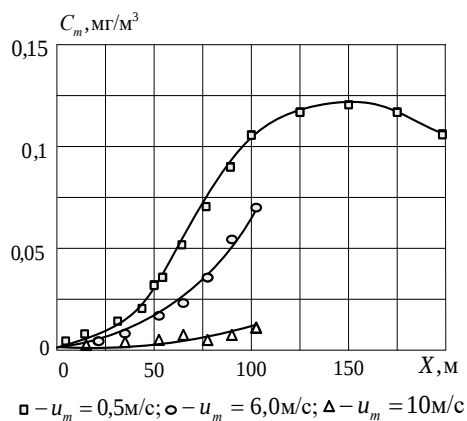


Рис. 1. Изменение приземной концентрации твердых частиц в пределах санитарно-защитной зоны котельной от различных скоростей ветра в слоях атмосферы

Обсуждение результатов

На рис. 2 показана зависимость изменения концентрации золых частиц в атмосфере от средних значений скорости ветра в слоях атмосферы (для опасной скорости ветра $u_m = 2\text{ м/с}$).

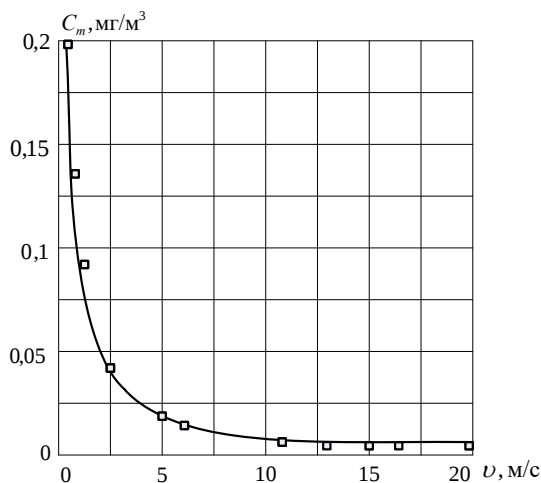


Рис. 2. График распределения концентрации золых частиц в слоях атмосферы от средней скорости ветра в слое

В условиях минимальной скорости ветра в слое $v = 0,5\text{ м/с}$ содержание примеси твердых частиц в воздухе составляет не более $0,2\text{ мг/м}^3$, что составляет $0,4\text{ ПДК}$. Измерения показали, что для опасной скорости ветра концентрация золых частиц в гетерогенных выбросах для момента рассеивания соответствует $0,05\text{ мг/м}^3$. Разбавление дымового факела в приземных слоях в пределах роста скорости ветра в слое атмосферы от 6 до 10 м/с приводит к снижению C_m от $0,0166$ до $0,0063\text{ мг/м}^3$. Результаты расчетов показали, что в зоне расположения котельной для среднегодовой скорости ветра $v = 6\text{ м/с}$ обеспечивается концентрация твердых частиц в воздухе равная $0,03\text{ ПДК}$.

Отметим, что при расчетах не учитывалось влияние восходящих потоков воздуха, обусловленных нагреванием подстилающей поверхности солнечным излучением, на распределение и седиментацию золовых частиц.

На рис. 3 показана зависимость распределения концентрации твердых выбросов в слоях атмосферы от координаты территории, прилегающей к котельной, для опасной скорости ветра $u_m = 2$ м/с.

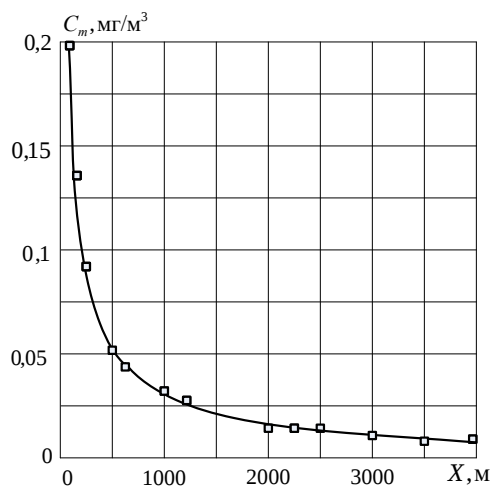


Рис. 3. Распределение концентрации золовых выбросов в слоях атмосферы в зависимости от координаты территории, прилегающей к котельной, для опасной скорости ветра $u_m = 2$ м/с

Для относительного изменения координаты подстилающей поверхности $0 \leq \frac{X}{X_M} \leq 20$ содержание золовых частиц уменьшается в 10 раз до $C_m = 0,02$ мг/м³.

Отметим, что в пределах наблюдения X_M максимальная приземная концентрация составила 0,4 ПДК. Коэффициент турбулентной диффузии вихря $K_z = 0,8$ м²/с в рассмотренных условиях определен для граничных условий $x = X_M$, $C = C_{\max}$, $u = 0,5$ м/с. Характер изменения скорости ветра с высотой выявлен в соответствии с (3) величиной шероховатости подстилающей поверхности $z_0 = 0,03$ м с учетом измеренных значений скоростей ветра на уровне флюгера метеостанции $z_1 = 10$ м. Максимальная концентрация золовых частиц, удовлетворяющая условию $K_z = 0,8$ м²/с, равна 0,112 мг/м³.

Выводы

Установлены валовые выбросы золовых частиц, образующихся в процессе сжигания нефтяного кокса в слоевом твердотопливном котле КЕ-10-14С.

Определены концентрации золовых частиц в воздухе атмосферы в зависимости от метеорологических параметров окружающей среды (скорости ветра в слое, опасной скорости ветра, класса устойчивости атмосферы, коэффициента турбулентной диффузии $K_z = 0,8$ м²/с) в районе расположения котельной.

Выявлены значения средних скоростей ветра и коэффициента турбулентной диффузии в слоях атмосферы, обеспечивающие санитарно-гигиенические показатели рассеивания примесей золовых частиц в воздухе на уровне, не превышающем предельно допустимых концентраций.

Для относительной координаты подстилающей поверхности в диапазоне $0 \leq \frac{X}{X_M} \leq 20$ установлен характер изменения содержания золовых частиц в пространстве рассеивания дымового факела в зоне действия котельной.

Литература

1. Липов Ю.М., Самойлов Ю.Ф., Виленский Т.В. Компоновка и тепловой расчет парового котла. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 298 с.: ил.
2. Волков Э.П., Лысков М.Г., Фетисова Е.И. Методы расчета приземных концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе. Москва: МЭИ, 1991. 56 с.
3. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание третье, переработанное и дополненное. Санкт-Петербург: ЦКТИ, ВТИ, 1998. 257 с.
4. Иваницкий М.С. Содержание токсичных продуктов в уходящих газах перспективных угольных энергоблоков 660 и 1060 МВт // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 4. С. 5–9.
5. Brorstron-Lunden, E., Lindsleog, A. Degradation of PAH during simulated stacle gas sampling / E. Brorstron-Lunden, A. Lindsleog // Environmental Science and Technology. 1985. V. 19. № 4. P. 313–316.
6. Longwell J.P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion. 19 Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1982. P. 1339–1350.
7. Иваницкий М.С., Грига А.Д. Перевод пылеугольных котлов на сжигание природного газа для сокращения выбросов бенз(а)пирена в воздушный бассейн // Вестник МЭИ. 2015. №2. С. 79–82.
8. Иваницкий М.С. Суммарная агрессивность газовых выбросов пылеугольных котлов, обусловленная компонентами неполного сгорания // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 5 (97). С. 70–75.
9. Frenklach M., Clary D.W., Yuan T. et al. Mechanism of soot formation in acetylene-oxygen mixtures // Combustion Science and Technology. 1986. V. 50. № 1–3. P. 79–115.
10. Тумановский А.Г., Ольховский Г.Г. Пути совершенствования угольных ТЭС России // Электрические станции. 2015. № 1. С. 67–73.

Автор публикации

Иваницкий Максим Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: mseiv@yandex.ru.

References

1. Lipov Yu.M., Samoilov Yu.F., Vilenskii T.V. Komponovka i teplovoi raschet parovogo kotla. Moskva: Energoatomizdat, 1988. 298 s.: il.
2. Volkov E.P., Lyskov M.G., Fetisova E.I. Metody rascheta prizemnykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v atmosfernom vozdukh. Moskva: MEI, 1991. 56 s.
3. Teplovoi raschet kotlov (Normativnyi metod). Izdanie tret'e, pererabotannoe i dopolnennoe. Sankt-Peterburg: TsKTI, VTI, 1998. 257 s.
4. Ivanitskii M.S. Soderzhanie toksichnykh produktov v ukhodyashchikh gazakh perspektivnykh ugol'nykh energoblokov 660 i 1060 MVt // Energobezopasnost' i energosberezhenie. 2016. № 4. S. 5–9.
5. Brorstron-Lunden, E., Lindsleog, A. Degradation of PAH during simulated stacle gas sampling / E. Brorstron-Lunden, A. Lindsleog // Environmental Science and Technology. 1985. V. 19. № 4. P. 313–316.
6. Longwell J.P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion. 19 Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1982. P. 1339–1350.
7. Ivanitskii M.S., Griga A.D. Perevod pyleugol'nykh kotlov na szhiganie prirodnogo gaza dlya sokrashcheniya vybrosov benz(a)pirena v vozdushnyi bassein // Vestnik MEI. 2015. №2. S. 79–82.

8. Ivanitskii M.S. Summarnaya agressivnost' gazovykh vybrosov pyleugol'nykh kotlov, obuslovlennaya komponentami nepolnogo sgoraniya // Energoberezhenie i vodopodgotovka. 2015. № 5 (97). S. 70–75.

9. Frenklach M., Clary D.W., Yuan T. et al. Mechanism of soot formation in acetylene-oxygen mixtures // Combustion Science and Technology. 1986. V. 50. № 1–3. P. 79–115.

10. Tumanovskii A.G., Ol'khovskii G.G. Puti sovershenstvovaniya ugol'nykh TES Rossii // Elektricheskie stantsii. 2015. № 1. S. 67–73.

Author of the publication

Ivanitskiy Maxim Sergeevich – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. prof. of the department «Heat and power engineering and thermal engineering» (HPETE), Branch of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI).

Поступила в редакцию

22 января 2018 года.

ФИЗИКА

УДК 536.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ХАРАКТЕРНЫХ СЕЧЕНИЯХ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ЗАМКНУТОГО ДВУХФАЗНОГО ТЕРМОСИФОНА

Г.В. Кузнецов, А.Е. Нурпейис

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия
nurpeiis_atlant@mail.ru

Резюме: Представлены результаты экспериментального определения распределений температур в характерных сечениях рабочей зоны замкнутого двухфазного термосифона. Исследования процессов теплопереноса проводились в термосифоне, изготовленном из меди с постоянной площадью поперечного сечения. Высота теплообменника 161 мм, толщина боковых стенок 1,5 мм, нижней стенки 2 мм, внутренний диаметр испарительной части и парового канала 39 мм. По результатам экспериментальных исследований установлена зависимость изменения характерных температур от величины теплового потока, подводимого к нижней крышке термосифона, и коэффициента заполнения. Установлено, что увеличение теплового потока на нижней крышке термосифона приводит к снижению перепада температур по паровому каналу и сокращению времени выхода на стационарный режим работы. Эксперименты показали, что даже при высоких тепловых нагрузках (до 11,2 кВт/м²) перепады температур по высоте термосифона не превышают 9 К.

Ключевые слова: двухфазный термосифон, тепловой поток, теплоперенос, испарение, конденсация, коэффициент заполнения.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-136-144

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF TEMPERATURES IN CHARACTERISTIC SECTIONS OF THE WORKING ZONE OF A CLOSED TWO-PHASE THERMOSYPHON

G.V. Kuznetsov, A.E. Nurpeiis
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
nurpeiis_atlant@mail.ru

Abstract: In article, presents the results of experimental determination of temperature distributions in characteristic sections of the working zone of a closed two-phase thermosyphon. A thermosyphon made of copper with a constant cross-sectional area is used to study heat transfer. The height of the heat exchanger is 161 mm, the thickness of the side walls is 1.5 mm, the bottom wall is 2 mm, the internal diameter of the evaporative part and the vapor channel is 39 mm. Experimental results give dependences of the change in the characteristic temperatures on the heat flux supplied to the bottom cover of the thermosyphon and the filling ratio. An increase in the heat flow at the bottom cover of the thermosyphon leads to a decrease in the temperature drop along the vapor channel and a reduction in the time to reach the stationary mode of operation.

Experiments show that even at high thermal loads (up to 11,2 kW/m²) the temperature drops over the height of the thermosyphon do not exceed 9 K.

Keywords: *two-phase thermosyphon, heat flow, heat transfer, evaporation, condensation, filling ratio.*

Введение

Замкнутые двухфазные термосифоны (ТС) как инструмент переброса теплоты из зоны высоких температур энергонасыщенного оборудования известны достаточно давно [1; 2]. Но несмотря на то, что в последние годы происходит заметная интенсификация исследований по изучению процессов теплопереноса в ТС [3; 4], примеров их реального использования в современной технике и технологиях пока мало. Среди многочисленных задач анализа связей характеристик работы термосифонов и их конструктивных параметров наибольшее значение, скорее всего, имеет задача оценки «производительности» их работы (интенсивности теплопереноса) и анализ влияния основных значимых факторов. Основными характеристиками работы термосифонов во многих случаях [5; 6] рассматриваются их эффективная теплопроводность или термическое сопротивление. Но эти характеристики обеспечивают, как правило, только интегральные оценки производительности ТС и не являются базой для анализа закономерностей теплопереноса в таких сложных теплообменниках.

Существенно более значимой для физического анализа является информация по температурным полям характерных зон термосифона. Но в связи с объективными трудностями такого рода измерений в большинстве публикаций приводятся результаты регистрации температур только на отдельных участках внешней поверхности (T_n) таких теплообменников [7; 8]. Вследствие же достаточно интенсивного перетока теплоты по корпусу ТС как по поперечной, так и по продольной координатам, измерения T_n недостаточны для анализа процессов, протекающих в зонах испарения и конденсации, а также в паровом канале. Немногочисленные результаты определения температур в самом термосифоне [9; 10] отражают их изменение только в отдельных точках внутренней поверхности этого устройства. Для объективного анализа закономерностей процессов теплопереноса необходима информация о распределениях температур (T) или хотя бы о градиентах T на отдельных участках, соответствующих зонам испарения, транспорта пара и его конденсации. Известные результаты теоретического исследования этих процессов, например, [11–13], получены с использованием сложных математических моделей. Решение задач такого типа трудоемко и требует больших затрат времени. Для упрощения же постановок задач типа [11–13] пока недостаточно экспериментальных данных по закономерностям теплопереноса в термосифонах. Поэтому экспериментальные исследования температурных полей термосифонов актуальны.

Описание экспериментальной установки и методики проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований температурных полей термосифона при различных условиях подвода теплоты разработан стенд [14], принципиальная схема которого показана на рис. 1. Стенд состоит из корпуса термосифона; систем подвода теплоты в зоне испарения и отвода в зоне конденсации, заполнения термосифона теплоносителем; средств регистрации температур – термопар.

При разработке экспериментального стенда основной задачей была достоверная регистрация температур в характерных точках парового канала, зон испарения и конденсации. При постановке эксперимента основные трудности заключались в обеспечении герметичности внутренней полости термосифона, контроля положения термопар и обеспечении стабильных условий подвода теплоты к нижней крышке и отвода с верхней.

В общем случае термосифоны могут использоваться как средство отвода теплоты в аварийных режимах, когда подводимый тепловой поток изменяется с ростом времени. Но этот вариант тепловой нагрузки не является наиболее типичным, поэтому все

экспериментальные результаты выполнялись для стационарных условий подвода теплоты и охлаждения верхней крышки термосифона. Тепловые потоки в характерных сечениях термосифона при этом менялись вследствие роста температур с течением времени. Но тепловой поток к нижней границе нижней крышки выдерживался постоянным.

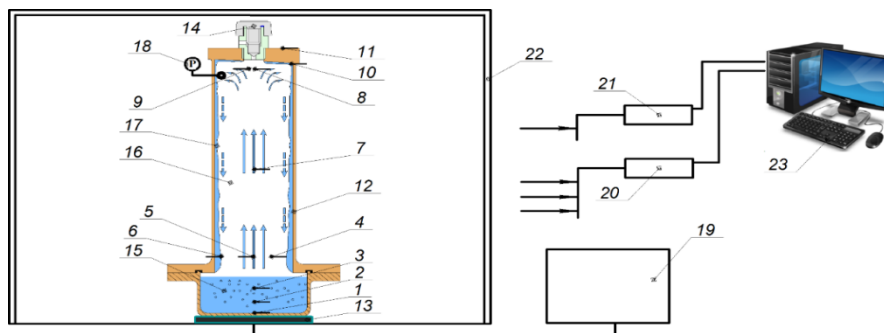


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 – термопары; 12 – корпус термосифона; 13 – нагревательный элемент; 14 – регулирующий клапан; 15 – рабочая жидкость; 16 – паровой канал; 17 – пленка конденсата; 18 – источник питания; 19 – датчик давления; 20 – аналого-цифровой преобразователь NI 9214; 21 – аналого-цифровой преобразователь NI USB-6001; 22 – стеклянный бокс; 23 – персональный компьютер

Исследования процессов теплопереноса проводились в термосифоне, изготовленном из меди с постоянной площадью поперечного сечения. Высота ТС 161 мм, толщина боковых стенок 1,5 мм, нижней стенки 2 мм, внутренний диаметр испарительной части и парового канала 39 мм. Верхняя крышка теплообменного аппарата выполнена под углом $\gamma = 3^\circ$ к плоскости основания для обеспечения движения конденсата по одной стенке. На крышке термосифона установлен клапан, предназначенный для регулирования в случае необходимости давления в паровом канале и сброса неконденсирующихся газообразных смесей и воздуха в окружающую среду. Подвод теплоты осуществлялся с помощью нагревательного элемента, на который подавалось напряжение (до 100 В) и переменный ток (от 0,04 до 0,2 А) с однофазного автотрансформатора. Измерительная схема установки (рис. 1) позволяла регистрировать одновременно температуры: слоя жидкости на оси симметрии (термопары № 1–3), на нижней границе (термопары № 4–6), в средней части (термопара № 7) и верхней (термопары № 8, 9) границе парового канала, в верхней части вертикальной стенки (термопара № 10), на верхней наружной стенке (термопара № 11). Также регистрировались подводимая мощность и давление в паровом канале термосифона. По результатам предварительных экспериментов установлено, что на работу термосифона достаточно существенно влияют внешние факторы (движение атмосферного воздуха, работа систем вентиляции, температура в помещении и т.д.). По этой причине для снижения последствий влияния таких случайных факторов на результаты исследований ТС размещался в стеклянном боксе 21 (рис. 1).

В процессе исследования применялась классическая методология проведения экспериментов [15], в соответствии с которой определялось влияние каждого значимого фактора. Данный подход, несмотря на достаточно большие временные затраты, был наиболее оправданным при исследовании теплопереноса в термосифоне. В качестве теплоносителей в термосифонах применяют и исследуют разные жидкости [16; 17]. Основным теплоносителем, с которым проводились эксперименты, выбрана дистиллированная вода. Выбор такой жидкости обусловлен рядом факторов. Во-первых, она является взрыво- и пожаробезопасным, а также легкодоступным веществом.

Коэффициент заполнения термосифона определялся по формуле

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{ж}}}{V_{\text{ТС}}},$$

где $V_{\text{ж}}$ – объем теплоносителя, м^3 ; $V_{\text{ТС}}$ – объем термосифона, м^3 .

Значения коэффициентов заполнения при различных объёмах теплоносителя приведены в таблице.

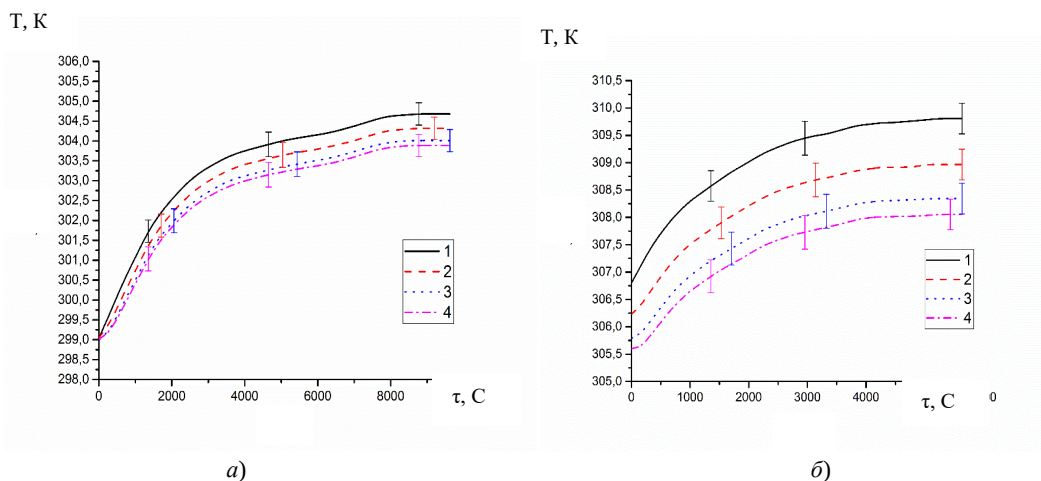
Таблица

Значения коэффициентов заполнения при различных объемах теплоносителя				
$V_{\text{ж}}, \text{см}^3$	7	14	21	28
$\varepsilon, \%$	4	8	12	16

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны типичные термограммы, полученные при проведении экспериментов в интервале тепловых нагрузок от 0,7 до 20 $\text{кВт}/\text{м}^2$ при заполнении водой полости термосифона ($\varepsilon=4\%$).

Результаты измерений выполнены в исследуемом диапазоне тепловых нагрузок с наиболее приемлемыми интервалами изменения основного варьируемого в экспериментах фактора – q . В соответствии с общей теорией планирования эксперимента [15] интервалы между численными значениями фактора в диапазоне от минимального до максимального значения выбираются такими, чтобы обеспечить адекватность интерпретации по результатам измерений физических закономерностей исследуемого процесса. В рассматриваемом случае важным является то, что во всем диапазоне изменения q от 0,7 до 20, $\text{кВт}/\text{м}^2$ есть значения, соответствующие тепловым нагрузкам конкретного оборудования разных отраслей техники. В то же время отсутствуют экспериментальные данные по распределениям T в термосифонах и, это главное, о максимальных перепадах температур по паровому каналу. Кроме того, известно, что для каждого термосифона есть предельные тепловые нагрузки, при которых не наступает осушение испарительной части, и эти предельные значения q до настоящего времени определяются только в экспериментах. К вышеизложенному следует добавить, что в настоящее время нет прямых теоретических или экспериментальных доказательств монотонности зависимостей температур в характерных точках зон испарения, транспорта и конденсации от величины теплового потока, поступающего к нижней крышке термосифона. Поэтому интервалы варьирования основного значимого фактора q были выбраны на уровне 0,5–20 $\text{кВт}/\text{м}^2$ во всем диапазоне изменения до предельных значений, соответствующих кипению хладагента.



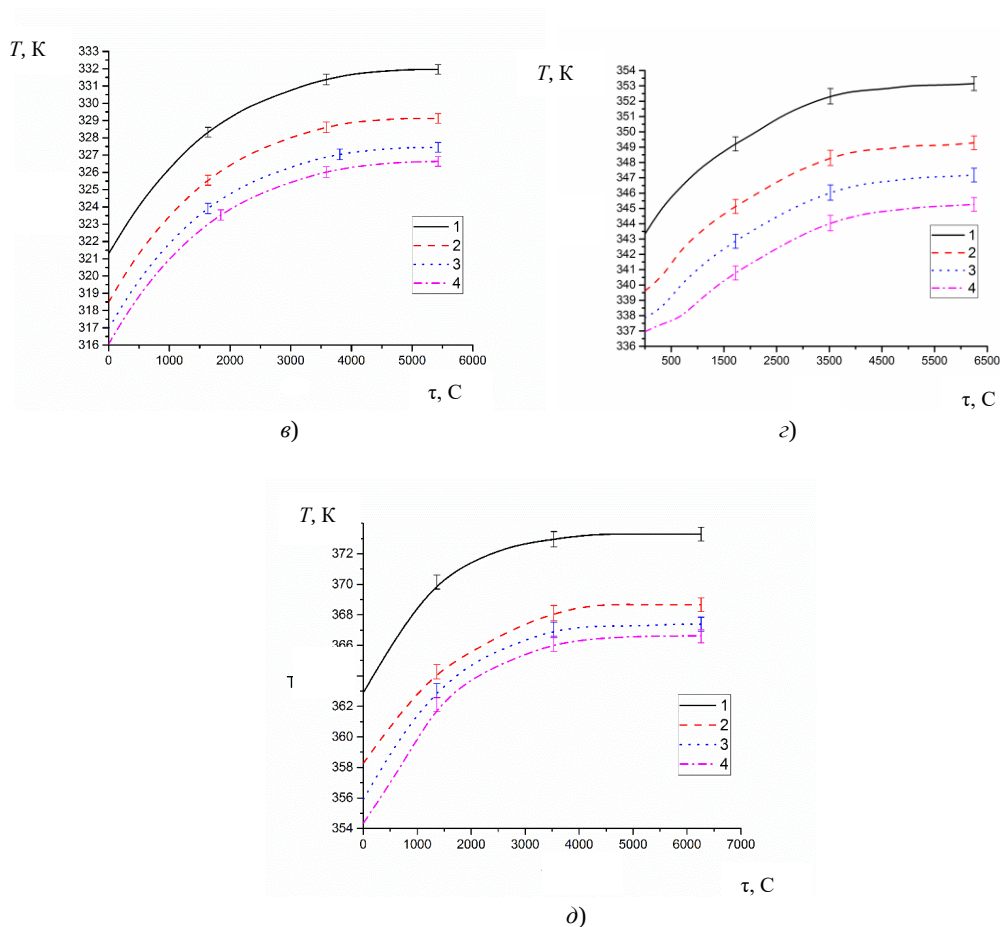


Рис. 2. Зависимости температур в характерных точках от времени при коэффициенте заполнения термосифона 4% и тепловой нагрузке: а) $q=0,7$ кВт/м², б) $q=2,1$ кВт/м²; в) $q=6,3$ кВт/м²; г) $q=11,2$ кВт/м²; д) $q=17,5$ кВт/м² (1 – слой теплоносителя; 2 – нижняя граница парового канала; 3 – центр парового канала; 4 – верхняя граница парового канала)

Анализ показанных на рис. 2 зависимостей температуры в характерных точках от времени показал, что процесс выхода на стационарный режим температурных полей термосифона длительный во всем диапазоне изменения тепловых потоков. Температура во всех точках регистрации растет в диапазоне времени 3000–5000 секунд. Так при $q=0,7$ кВт/м² температура за 4000 с повышается на 4,5 К, а при $q=1,6$ кВт/м² – на 2,5 К. Важным при этом является то, что практически неизменными остаются во всем временном интервале (до 5000 с) разности показаний термопар, расположенных в различных точках парового канала. Например, разность температур между зонами испарения и конденсации (точнее между границами этих зон) составляет от 0,5 до 0,8 К при $q=0,7$ и 1,1 кВт/м² в интервале времени $0 < t < 5000$ с, при $q=1,6$ кВт/м² 0,9 К. Можно отметить, что установленная в экспериментах нестационарность температурных полей внутренней полости термосифона не является значительной и при анализе основных закономерностей работы термосифонов ее можно в первом приближении не учитывать. В то же время необходимо уточнить, что изменение на 2–3 К температур пара и конденсата в паровом канале за 2,5 часа работы обусловлена постепенным прогревом стенок и крышки термосифона. Кроме того, происходит подъем температуры (хотя и незначительный) воды в области нижней крышки,

что приводит к росту температуры поверхности испарения и пара. Установлено, что с увеличением теплового потока изменение T внутри термосифона происходит до начала кипения равномерно во всех его точках по продольной координате, и время выхода на стационарный режим работы сокращается незначительно. Это связано тем, что с ростом тепловой нагрузки интенсифицируются процессы испарения воды и конденсации пара на верхней крышке (частично на боковых поверхностях термосифона).

Ниже показаны зависимости перепада температур в термосифоне от теплового потока, установленные по результатам экспериментов. Такие зависимости необходимы для экспериментальной оценки условий выхода термосифона на аварийный режим. В таком случае происходит осушение верхней поверхности нижней крышки термосифона, и перепад температур по паровому каналу падает до очень малых значений (десятых долей градуса).

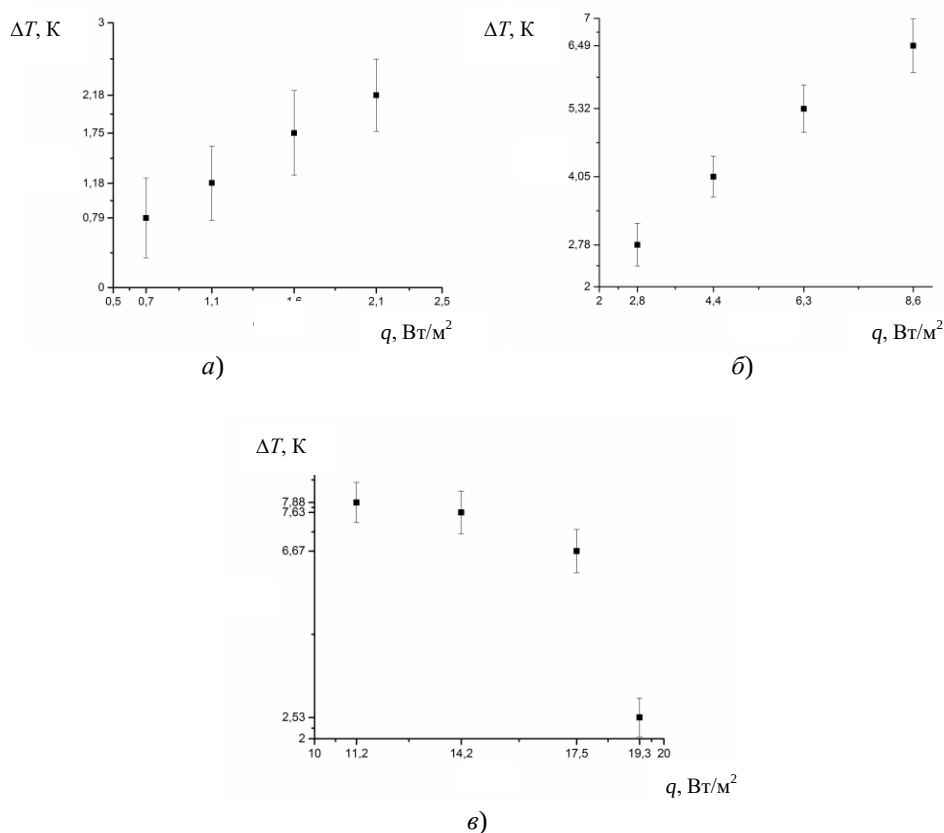


Рис. 3. Зависимости перепада температур в термосифоне от теплового потока при коэффициенте заполнения 4% в диапазоне изменения q от 0,7 до 19,3 кВт/м²

Анализируя зависимости перепада температур в термосифоне от теплового потока на рис. 3, можно сделать вывод, что с ростом q до 10 кВт/м² перепад T между нижней границей термосифона и верхней границей парового канала увеличивается, а затем, начиная с $q = 11,2$ кВт/м², падает. Это обусловлено тем, что с ростом тепловых потоков до предельного значения $q = 11,2$ кВт/м² последовательно растут температура воды в области нижней крышки, скорость испарения, скорость движения пара и его температура, а также скорость конденсации пара на верхней крышке. При этом, вследствие умеренных температур жидкой и паровой фаз скорость движения пара относительно невелика и перепады T по высоте канала составляют от 0,5 до 8 К. С ростом q до значений, соответствующих кипению

хладагента, скорость парообразования и, соответственно, оттока пара от поверхности раздела фаз растёт. В результате более «горячий» пар быстрее перемещается от нижней крышки термосифона в зону конденсации, происходит более интенсивная конденсация и, соответственно, более интенсивное тепловыделение с ростом (по сравнению с малыми q) температуры конденсата на верхней крышке. Дальнейший рост q приводит к еще большим скоростям парообразования при кипении и конденсации пара на верхней крышке. В результате перепад температур по высоте падает до 2,5 К при $q=19,3$ кВт/м². Полученный результат дает основание для вывода о том, что в режиме кипения, предельном – с одной стороны, и наиболее эффективном – с другой, гидродинамические процессы в паровом канале не играют большой роли в переносе теплоты по ТС. Другими словами, можно предположить, что расчет гидродинамики течения пара, скорее всего, нецелесообразен. Для обоснованного прогноза эффективности теплопереноса в термосифоне достаточно знать скорости испарения хладагента и конденсации пара. В этом случае процедура расчета характеристик процесса теплопереноса в термосифоне может быть существенно упрощена, потому что будет необходимо математическое моделирование только процессов теплопроводности в нижней и верхней крышках ТС, слоях конденсата в его нижней и верхней частях, а также процессов испарения и конденсации на границах раздела фаз. Затраты времени на вычисление основных характеристик процесса при этом могут быть снижены во много раз. Анализ зависимостей рис. 3 показал, что при относительно больших тепловых потоках ($q=19,3$ кВт/м²) перепад температуры в ТС снижается почти в 3 раза по сравнению с тепловым потоком $q=11,2$ кВт/м², что обусловлено, скорее всего, ростом температуры корпуса термосифона и увеличением скорости перетока пара из зоны испарения в зону конденсации.

Заключение

В заключение следует отметить, что зарегистрированные в проведенных экспериментах перепады температур между поверхностями испарения и конденсации в термосифоне дают основание для гипотезы о том, что моделирование температурных полей ТС, скорее всего, возможно с достаточно высокой достоверностью без описания процессов движения пара в паровом канале с использованием сложных моделей гидродинамики на базе уравнений Навье-Стокса [12; 13] или модели Прандтля [11].

Литература

1. Franco A., Filippeschi S. Experimental analysis of closed loop two - phase thermosyphon (CLTPT) for energy systems // Experimental thermal and fluid science. 2013. V. 51. P. 302–311.
2. Shokrpour Roudbari M., van Brummelen E. H., Verhoosel C. V. A multiscale diffuse-interface model for two-phase flow in porous media // Computers and Fluids. 2016. V. 141. P. 212–222.
3. Jafari D., Franco A., Filippeschi S., Di Marco P., Two-phase closed thermosyphons: A review of studies and solar applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. Vol. 53. P. 575–593.
4. P. Zhang, B. Wang, W. Shi, X. Li, Experimental investigation on two-phase thermosyphon loop with partially liquid-filled downcomer // Applied Energy. 2015. Vol. 160. P. 10–17.
5. P. Naphon, P. Assadamongkol, T. Borirak, Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency, International Communications in Heat and Mass Transfer. 2008, Vol. 35. Issue 10. P. 1316–1319.
6. R. Renjith Singh, V. Selladurai, P.K. Ponkarthik, A. Brusly Solomon. Effect of anodization on the heat transfer performance of flat thermosiphon // Experimental Thermal and Fluid Science. 2015. V. 68. P. 574–581.
7. I. Khazaee, R. Hosseini, S.H. Noie, Experimental investigation of effective parameters and correlation of geyserboiling in a two-phase closed thermosyphon // Applied Thermal Engineering. 2010. Vol. 30, Issue 5, P. 406–412.
8. Engin Gedik, Experimental investigation of the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon at different operating conditions // Energy and Buildings. 2016. Vol.127, P. 1096–1107.

9. Noie S.H., Sarmasti Emami M.R., Khoshnoodi M. Effect of inclination angle and filling ratio on thermal performance of a two-phase closed thermosyphon under normal operating conditions // *Heat Transf Eng.* 2007. V. 28. P. 365–371.
10. Ibrahim E., Moawed M., Berbish N. S. Heat transfer characteristics of rotating triangular thermosyphon // *Heat Mass Transfer.* 2012. V. 48. P. 1539–1548.
11. Кузнецов Г.В., Ситников А.Е. Численный анализ основных закономерностей тепломассопереноса в высокотемпературной тепловой трубе // *Теплофизика высоких температур.* 2002. 898–904.
12. Krasnoshlykov A.S., Kuznetsov G.V. Mathematical modeling of thermal modes of thermosyphons in operation with characteristic heat loads of aircraft equipment batteries // *Russian Aeronautics.* 2017. V. 60 (2). P. 251–256.
13. Nurpeiis A.E., Nemova T.N. The opportunity analyses of using thermosyphons in cooling systems of power transformers on thermal stations // *MATEC Web of Conferences. Heat and mass transfer in the system of thermal modes of energy. Technical and technological equipment.* 2016. V. 72.
14. Feoktistov E.A., Vympin E.A., Nurpeiis A.E. *MATEC Web of Conf.* 72, 01081 (2016).
15. Семенов Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях. Москва: Лань, 2013.
16. Безродный М.К., Сосновский В.И., Алексеенко Д.В. Исследование критических тепловых потоков при кипении фреона – Ii в кольцевых двухфазных термосифонах // *Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО, 1977. Вып.1. С. 112–120.*
17. Jouhara H., Robinson A.J. Experimental investigation of small diameter two phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283 // *Applied Thermal Engineering.* 2010. V. 30. P. 201–211.

Авторы публикации

Кузнецов Гений Владимирович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и промышленная теплотехника» Томского политехнического университета. E-mail: marisha@tpu.ru.

Нурпейис Атлант Едилулы – ассистент кафедры «Теоретическая и промышленная теплотехника» Томского политехнического университета. E-mail: nurpeiis_atlant@mail.ru.

References

1. Franco A., Filippeschi S. Experimental analysis of closed loop two - phase thermosyphon (CLTPT) for energy systems // *Experimental thermal and fluid science.* 2013. V. 51. P. 302–311.
2. Shokrpour Roudbari M., van Brummelen E. H., Verhoosel C. V. A multiscale diffuse-interface model for two-phase flow in porous media // *Computers and Fluids.* 2016. V. 141. P. 212–222.
3. Jafari D., Franco A., Filippeschi S., Di Marco P., Two-phase closed thermosyphons: A review of studies and solar applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2016. Vol. 53. P. 575–593.
4. P. Zhang, B. Wang, W. Shi, X. Li, Experimental investigation on two-phase thermosyphon loop with partially liquid-filled downcomer // *Applied Energy.* 2015. Vol. 160. P. 10–17.
5. P. Naphon, P. Assadamongkol, T. Borirak, Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency, *International Communications in Heat and Mass Transfer.* 2008, Vol. 35. Issue 10. P. 1316–1319.
6. R. Renjith Singh, V. Selladurai, P.K. Ponkarthik, A. Brusly Solomon. Effect of anodization on the heat transfer performance of flat thermosiphon // *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2015. V. 68. P. 574–581.
7. I. Khazaei, R. Hosseini, S.H. Noie, Experimental investigation of effective parameters and correlation of geyserboiling in a two-phase closed thermosyphon // *Applied Thermal Engineering.* 2010. Vol. 30, Issue 5, R. 406–412.

8. Engin Gedik, Experimental investigation of the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon at different operating conditions // *Energy and Buildings*. 2016. Vol.127, P. 1096–1107.
9. Noie S.H., Sarmasti Emami M.R., Khoshnoodi M. Effect of inclination angle and filling ratio on thermal performance of a two-phase closed thermosyphon under normal operating conditions // *Heat Transf Eng*. 2007. V. 28. R. 365–371.
10. Ibrahim E., Moawed M., Berbish N. S. Heat transfer characteristics of rotating triangular thermosyphon // *Heat Mass Transfer*. 2012. V. 48. P. 1539–1548.
11. Kuznetsov G.V., Sitnikov A.E. CHislennyj analiz osnovnyh zakonomernostej teplomassoperenosa v vysokotemperaturnoj teplovoj trube // *Teplofizika vysokih temperatur*, 2002. 898–904.
12. Krasnoshlykov A.S., Kuznetsov G.V. Mathematical modeling of thermal modes of thermosyphons in operation with characteristic heat loads of aircraft equipment batteries // *Russian Aeronautics*. 2017. V. 60 (2). P. 251–256.
13. Nurpeiis A.E., Nemova T.N. The opportunity analyses of using thermosyphons in cooling systems of power transformers on thermal stations // *MATEC Web of Conferences*. Heat and mass transfer in the system of thermal modes of energy. Technical and technological equipment. 2016. V. 72.
14. Feoktistov E.A., Vympin E.A., Nurpeiis A.E. *MATEC Web of Conf*. 72, 01081 (2016).
15. Semenov B.A. *Inzhenernyj eksperiment v promyshlennoj teplotekhnike, teploenergetike i teplotekhnologiyah*. Moskva: Lan', 2013.
16. Bezrodnyj M.K., Sosnovskij V.I., Alekseenko D.V. Issledovanie kriticheskikh teplovyh potokov pri kipeanii freona – li v kol'tsevyh dvuhfaznyh termosifonah // *Voprosy radioelektroniki. Seriya TRTO*, 1977. Vyp.1. S. 112–120.
17. Jouhara H., Robinson A.J. Experimental investigation of small diameter two phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283 // *Applied Thermal Engineering*. 2010. V. 30. P. 201–211.

Authors of the publication

Geniy V. Kuznetsov – Tomsk polytechnic university, Doctor of Physical - Mathematical Sciences, Head of Department of thermal theory and engineering. E-mail: marisha@tpu.ru.

Atlant E. Nurpeiis – Tomsk Polytechnic University, Department of thermal theory and engineering, assistant. E-mail: nurpeiis_atlant@mail.ru.

Поступила в редакцию

12 декабря 2017 года.

АНАЛИЗ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО СОСТАВА

Э.Р. Сайфуллин¹, С.А. Назарычев¹, А.В. Газейкина¹, Ю.В. Ваньков², И.В. Ларионова³

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

Резюме: Содержание компонентов в газообразном топливе может меняться в широких пределах в зависимости от источника, времени и стадии разработки конкретного месторождения. Изменение состава приводит к изменению теплотехнических характеристик топлива, что влияет на эффективность процесса горения. В данной статье представлены результаты расчетов влияния состава топлива на его теплотехнические характеристики. Расчеты проводились с использованием аналитического и нормативного методов. Были получены зависимости удельной теплоты сгорания топлива от удельного расхода воздуха.

Ключевые слова: теплофизика, теплоэнергетика, оптимизация горения, переменный состав топлива, теплотехнические характеристики топлива, теплоэнергетические установки.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-145-150

ANALYSIS OF THERMOTECNICAL CHARACTERISTICS OF HYDROCARBON FUEL VARIABLE COMPOSITION

E.R. Saifullin¹, S.A. Nazarychev¹, A.V. Gazeykina¹, Y.V. Vankov², I.V. Larionova³

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Kazan National Research Technical University A.N. Tupolev, Kazan, Russia

Abstract: The content of components in gaseous fuels can vary widely, depending on the source, time and stage of development of a fuel field. The change in composition leads to a change in the thermotechnical characteristics of gas, which affects the efficiency of the combustion process. This article presents the results of calculations of the effect of the composition of fuel on its thermotechnical characteristics. Calculations were carried out using analytical and normative methods. The dependence of the fuel specific heat of combustion on the specific air rate was obtained.

Keywords: thermophysics, heat power engineering, optimization of combustion, fuel variable composition, fuel thermotechnical characteristics, power plants.

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». 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.

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), на теплоэлектростанциях, сжигающих ископаемые топлива, производится самая большая доля электроэнергии в мире [1]. Рост потребления электроэнергии заставляет задуматься над вопросами энергосбережения и энергоэффективности процессов горения углеводородного топлива.

Состав газообразного углеводородного топлива может варьироваться в зависимости от источника и времени. Основными причинами изменения состава топлива являются:

- Сезонные изменения;
- Периодическое накопление конденсата тяжелых углеводородов в газопроводах;
- Изменения, связанные со стадией разработки месторождения газа.

Изменения состава топлива приводит к операционной нестабильности теплоэнергетической установки и, тем самым снижают эффективность её работы [2-7]. В работах было показано, что изменение состава газа оказывает влияние на температуру горения, скорость горения, удельную теплоту сгорания, состав продуктов сгорания. В результате данных изменений нарушается стабильность работы теплоэнергетической установки: возникает вероятность срыва пламени (уход пламени вглубь топочного пространства), обратной вспышки (распространение пламени внутрь горелки), неустойчивости горения (пульсации давления), самовоспламенению (возгорание газозооной смеси в смесеобразовательном пространстве), локального перегрева поверхностей. Также, в результате влияния состава топлива на процесс горения появляются экологические риски.

Данные об изменениях состава топлива, как правило, недоступны по причинам коммерческого характера или из-за их отсутствия. Этот фактор является основным препятствием для решения проблемы сжигания топлив нестабильного состава. Поэтому в данной работе используются известные данные о составе газов, соответствующих ряду отечественных месторождений природного газа и нефти, предприятий по переработке нефти [8]. Такая информация позволяет оценить возможный диапазон изменения состава рассматриваемых топлив.

Для проведения анализа влияния состава газообразного углеводородного топлива на его теплотехнические характеристики целесообразно использовать апробированные методы расчета. В настоящее время на практике широко используется «нормативный» метод расчета котельных установок, который включает в себя расчет теплотехнических характеристик топлива. Но он требует знания теплотехнических характеристик всех компонентов топлива. Количество воздуха рассчитывается при условии полного сгорания топлива. Расчеты проводятся с использованием целого ряда полуэмпирических формул и не позволяют в явном виде установить зависимость между основными теплотехническими характеристиками, например, удельной теплотой сгорания и удельным количеством воздуха соответствующим полному сгоранию топлива.

Аналитические расчеты не только много проще обычных «нормативных», но и надежнее, вследствие резкого уменьшения числа арифметических операций, увеличивающих возможную максимальную ошибку вычислений. В частности, для углеводородных топлив метанового ряда в теории горения имеются соотношения для указанных выше характеристик топлива, позволяющие установить их зависимость от одного параметра – углеродного числа. Это дает возможность напрямую связать эти

характеристики топлива. В этом случае анализ влияния состава топлива на его теплотехнические характеристики будет гораздо проще и наглядней.

Цель данной работы – оценка влияния состава газообразного углеводородного топлива на его теплотехнические характеристики; определение зависимости удельной теплоты сгорания топлива от удельного (оптимального) расхода воздуха.

Условия расчета

В качестве примера состава газообразного топлива были взяты 15 месторождений природного газа, попутного нефтяного газа и нефтезаводских газов [8]. Составы газов приведены в (табл. 1).

Таблица 1

Месторождения углеводородных топлив								
№	Республика, область, месторождение	Состав газа, %						
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂
1. Месторождения природного газа								
1.1.	Коми, Ой-Войжское	88,6	1	0,2	0,09	0,06	0,05	10
1.2.	Тюменская обл., Арктическое	98,0	0,1	–	–	–	0,1	1,8
1.3.	Сахалинская обл., Прибрежное	98,0	0,2	–	–	–	0,8	1,0
1.4.	Калмыкия, Ики-Бурульское	91,0	6,0	0,1	–	–	0,3	8,0
1.5.	Волгоградская обл., Саушинское	98,2	4,0	0,15	–	–	0,05	1,2
2. Месторождения попутного нефтяного газа								
2.1.	Азербайджан, Биби-Эйват	90,7	3,0	0,5	1,4	2,0	1,4	1,0
2.2.	Чечено-Ингушетия, Западный Небит-Даг	91	3,0	2,3	1,3	1,8	0,5	–
2.3.	Башкирия, Шпаковское	40	15	17	6,9	4,0	0,1	–
2.4.	Куйбышевская обл., Жигулевское	43,2	14,5	19	7,9	4,9	0,5	–
2.5.	Татарстан, Бавлинское	35,5	21,8	19	8,5	4,8	0,1	–
3. Месторождения нефтезаводских газов								
3.1.	Башкирия, Шпаковское	1,1	3,7	18,4	31,2	6,2	26,8	12,8
3.2.	Татарстан, Елабуга	–	3,1	18,4	40,5	5,5	230	10,9
3.3.	Куйбышевская обл., Сероводское	–	2,6	11,3	36,8	9,1	17,2	23,0
3.4.	Волгоградская обл., Коробковское	–	2,1	12,7	27,9	10,3	26,8	20,2
3.5.	Куйбышевское обл., Покровское	–	–	7,0	36,4	6,4	26,0	24,2

Расчет проводился с использованием базовых соотношений нормативного метода, используемого для расчетов режимов работы котлов [9]. Для сравнения те же расчеты были проведены по упрощенной методике, на основании известных аналитических соотношений теории топочных процессов [10].

Результаты

Были рассчитаны основные теплотехнические характеристики рассмотренных видов топлива (табл. 2).

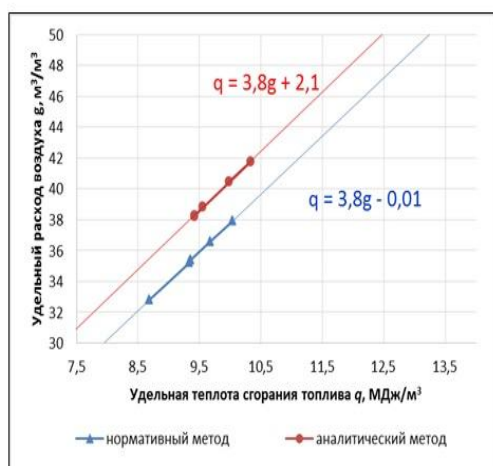
Таблица 2

Теплотехнические характеристики топлива различных месторождений										
№	Метод расчета									
	Нормативный					Аналитический				
	q , МДж/м ³	g	V_{NO_2}	V_{RO_2}	$V_{\text{H}_2\text{O}}$	q , МДж/м ³	g	V_{NO_2}	V_{RO_2}	$V_{\text{H}_2\text{O}}$
1.1	32,8	8,7	7,0	0,9	2,0	38,9	9,6	8,7	1,0	2,0
1.2	35,2	9,3	7,4	1,0	2,1	38,2	9,4	8,5	1,0	2,0
1.3	35,4	9,4	7,4	1,0	2,1	38,3	9,4	8,5	1,0	2,0
1.4	36,6	9,7	7,7	1,0	2,2	41,8	10,3	9,4	1,1	2,1
1.5	37,9	10,1	8,0	1,1	2,3	40,5	10,0	9,0	1,1	2,1
2.1	39,9	10,3	8,1	1,1	2,3	42,4	10,5	9,5	1,2	2,2
2.2	41,1	10,7	8,1	1,2	2,3	43,5	10,8	9,7	1,2	2,2

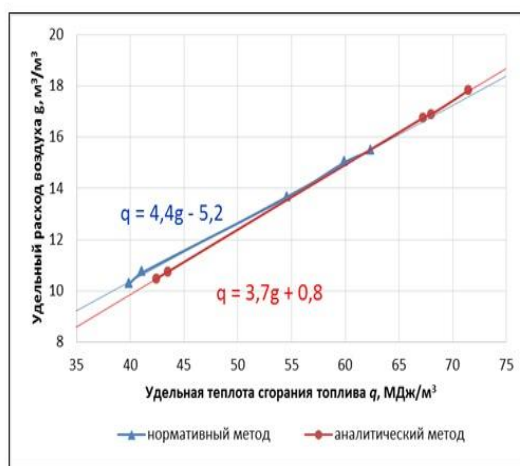
Продолжение таблицы 2

2.3	54,6	13,7	11,0	1,7	2,7	67,2	16,8	15,3	2,0	3,0
2.4	59,9	15,0	11,9	1,9	3,0	68,0	16,9	9,4	1,1	2,1
2.5	62,4	15,5	12,3	1,9	3,1	71,5	17,8	9,0	1,1	2,1
3.1	128,0	31,7	25,1	4,1	5,6	126,0	31,6	29,0	4,1	5,1
3.2	128,9	32,0	24,1	4,1	5,4	127,0	31,9	29,3	4,1	5,1
3.3	131,7	32,6	25,8	4,2	5,8	129,5	32,5	29,9	4,2	5,2
3.4	133,8	33,1	26,1	4,3	5,8	131,3	32,9	30,3	4,3	5,3
3.5	137,9	34,0	26,9	4,4	6,0	135,0	33,9	31,2	4,4	5,4

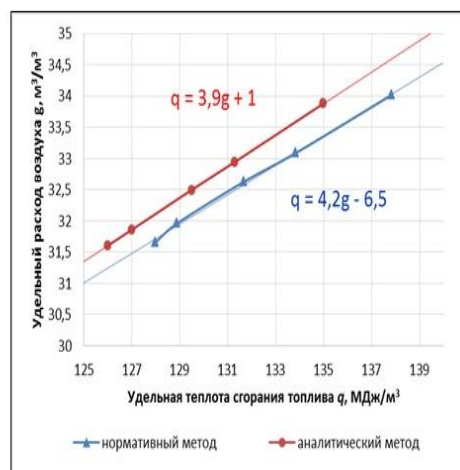
На основании полученных данных были определены зависимости удельного (оптимального) расхода воздуха от удельной теплоты сгорания топлива по двум методам для 3-х видов газообразного топлива. Ввиду того, что данные виды газов принадлежат метановому ряду C_nH_{2n+2} , зависимость их состава от теплотехнических характеристик приобретает линейный характер. Полученные зависимости, рассчитанные по аналитическому и нормативному методам, хорошо сопоставимы (см. рис.).



a)



b)



c)

Рис. Зависимости удельного расхода воздуха от удельной теплоты сгорания, рассчитанные нормативным и аналитическими методами, для природного газа (а); попутного нефтяного газа; (б); нефтезаводских газов (с)

Выводы

На основании известных данных о составе природного газа, попутного нефтяного газа и ряда отходов нефтехимической переработки выполнены расчеты и создана база данных об основных теплотехнических характеристиках рассмотренных видов топлива.

Установлена зависимость удельного оптимального количества воздуха с удельной теплотой сгорания углеводородного топлива. Показано, что по сравнению с нормативным, аналитический метод значительно проще и позволяет установить непосредственную наглядную связь удельного оптимального количества воздуха с удельной теплотой сгорания углеводородного топлива. Авторы рекомендуют использовать аналитический метод расчета теплотехнических характеристик топлива ввиду его наглядности и простоты.

Результаты послужат основой для анализа состава топлива на характер режимов горения в тепловых энергетических установках и поиска оптимальных расходов топлива и воздуха.

Литература

1. International Energy Agency, "Electricity Information 2015".
2. Roland T.H. Associated petroleum gas in Russia: reasons for non-utilization. Fridtjof Nansen Institute, Report 13/2010.
3. 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). Pp. 456-473.
4. Sayad P. Operational stability of lean premixed combustion in gas turbines an experimental study on gaseous alternative fuels, Doctoral Dissertation (2016), Lund University.
5. Syred N., Abdulsada M., Griffiths A., O'Doherty T., Bowen P. The effect of hydrogen containing fuel blends upon flashback in swirl burners (2012) Applied Energy, 89 (1), pp. 106–110.
6. Lieuwen T., McDonell V., Petersen E., Santavicca D. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability (2008) // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 130 (1). 011506.
7. Cala O.M., Meriño L., Kafarov V., Saavedra J. Evaluation of combustion models for determination of refinery furnaces efficiency (2015) Ingeniare, 23 (3), pp. 429–438.
8. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: справочное издание: В 3-х книгах. Книга 1 / Под ред. В.Г. Лисиенко. М: Теплотехник, 2003. 608 с.
9. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) 3-е издание. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998.
10. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьев, А.Г. Блох и др.; под ред. Г.Ф. Кнорре, И.И. Палеева. М.; Л.: Энергия, 1966. 491 с.

Авторы публикации

Сайфуллин Эмиль Ринатович – аспирант Казанского федерального университета. E-mail: mr.emilsr@gmail.com.

Назарычев Сергей Александрович – аспирант Казанского федерального университета. E-mail: nazarichev.sa@gmail.com.

Газейкина Ангелина Владимировна – магистр Казанского федерального университета. E-mail: mr.emilsr@gmail.com.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: yvankov@mail.ru.

Ларионова Ирина Викторовна – доцент КНИТУ – КАИ. E-mail: larionov11@yandex.ru.

References

1. International Energy Agency, "Electricity Information 2015".
2. Roland TH. Associated petroleum gas in Russia: reasons for non-utilization. Fridtjof Nansen Institute, Report 13/2010.
3. 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), pp. 456-473.
4. Sayad, P. Operational stability of lean premixed combustion in gas turbines an experimental study on gaseous alternative fuels, Doctoral Dissertation (2016), Lund University.
5. Syred, N., Abdulsada, M., Griffiths, A., O'Doherty, T., Bowen, P. The effect of hydrogen containing fuel blends upon flashback in swirl burners (2012) Applied Energy, 89 (1), pp. 106–110.
6. Lieuwen, T., McDonell, V., Petersen, E., Santavicca, D. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability (2008) // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 130 (1), 011506.
7. Cala, O.M., Meriño, L., Kafarov, V., Saavedra, J. Evaluation of combustion models for determination of refinery furnaces efficiency (2015) Ingeniare, 23 (3), pp. 429–438.
8. Lisienko V.G., Shchelokov Ya.M., Ladygichev M.G. «Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое исполнение»: справочное издание: В 3-х книгах. Книга 1 / Под ред. V.G. Lisienko. M: Teplotekhnika, 2003. 608 s.
9. Teplovoi raschet kotlov (normativnyi metod) 3-e izdanie. NPO TsKTI, SPb, 1998.
10. Teoriya topochnykh protsessov / G.F. Knorre, K.M. Arefev, A.G. Blokh i dr.; pod red. G.F. Knorre, I.I. Paleeva. M.; L.: Energiya, 1966. 491 s.

Authors of the publication

Saifullin Emil Rinatovich – post graduate Kazan Federal University.

Nazarychev Sergey Aleksandrovich – post graduate Kazan Federal University.

Gazeykina Angelina Vladimirovna – graduate student Kazan Federal University.

Vankov Yuriy Vitalevich – professor Kazan State Power Engineering University.

Larionova Irina Viktorovna – assistant professor Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev.

Поступила в редакцию

18 декабря 2017 года.