

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ОСЕВЫМИ РАЗМЕРАМИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ КОРОТКОГО ДИФFUЗОРА НА ЕГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

В статье проанализированы недостатки короткого диффузора и способы улучшения его работы, актуализирована проблема применительно к конструкции диффузора с направляющими. Выполнено теоретическое исследование короткого диффузора с различной длиной направляющих, описан объект исследования, изложена методика расчета. Представлены результаты исследований и их анализ, обозначено направление дальнейшей работы над этой задачей.

Ключевые слова: короткий диффузор, направляющие, поле скоростей, потери давления.

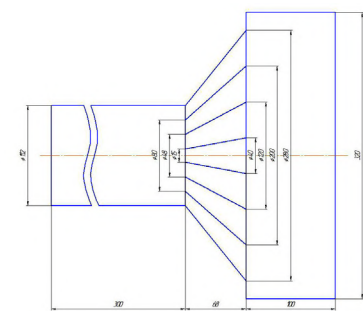
Короткие диффузоры нашли широкое применение в конструкциях фильтров и теплообменных аппаратов систем жизнеобеспечения, холодильных машин, компрессорных установок и т.п. для обеспечения равномерного подвода воздуха к фильтрующей или теплообменной поверхности. При этом основными показателями эффективности диффузора являются величина потерь давления газового потока между входным и выходным сечениями диффузора и равномерность распределения поля скоростей газового потока в выходном сечении диффузора. Однако, как показали ранее проведенные исследования [1], поток воздуха в коротком диффузоре не успевает раскрыться и воздействует преимущественно на центральную область ометаемой поверхности, что объясняется большим углом раскрытия диффузора и его малой относительной длиной. Это приводит к снижению эффективности фильтра или теплообменного аппарата [2]. Увеличение относительной длины диффузора позволяет повысить ометаемость фильтрующей или теплообменной поверхности [3], однако, ведет к значительному увеличению массогабаритных показателей устройств, что не всегда приемлемо.

Существуют различные устройства и рекомендации для повышения эффективности диффузора за счёт применения специальных элементов в его проточной части с целью получения равномерного потока на выходе из диффузора. К таковым можно отнести применение продольных ребер [4], полостей [5] или канавок [6], которые отодвигают границу

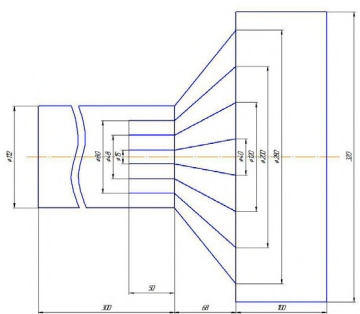
отрыва потока, но ограничивают область применения диффузорами с углом раскрытия не более 20° . В диффузорах с углами раскрытия больше $40-50^\circ$ можно добиться повышения эффективности путем частичного заполнения канала установкой различного рода обтекателей [7–9]. Недостатком данного метода является образование затенённых зон в выходном сечении диффузора и высокое гидравлическое сопротивление обтекателя. Из рекомендаций, приведенных в [10], наиболее целесообразным является применение специальных направляющих, позволяющих равномерно распределить поток за диффузором. При этом направляющие могут быть установлены на всю длину диффузора или укорочены. Подобное решение предлагается и другими авторами [11–14]. Однако какие-либо рекомендации по выбору длины направляющих и их соотношения с осевой длиной обечайки диффузора в указанных информационных источниках не приводятся. Таким образом, исследование коротких диффузоров с различными соотношениями между осевыми размерами элементов проточной части короткого диффузора, а именно между габаритной осевой длиной обечайки диффузора и осевой длиной направляющих газового потока в диффузоре является актуальным.

Объектом исследования в представленной работе выступает короткий диффузор со следующими вариантами исполнения концентрических направляющих:

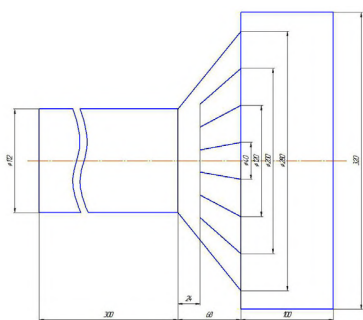
а) осевая длина направляющих и обечайки диффузора совпадают (рис. 1а);



а



б



в

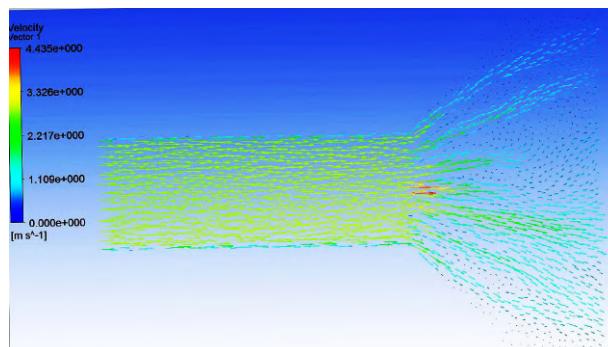
Рис. 1. Расчетная модель короткого диффузора с направляющими, выполненными:
а — на всю длину диффузора;
б — удлиненными; в — укороченными

б) осевая длина направляющих превышает осевую длину обечайки диффузора, при этом направляющие частично размещены в проточной части подводящего трубопровода (рис. 1б);

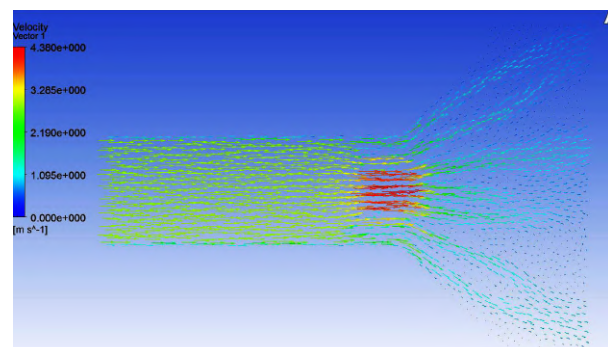
в) осевая длина направляющих меньше осевой длины обечайки диффузора, при этом входные кромки направляющих удалены от входного сечения диффузора в сторону его выходного сечения (рис. 1в).

Входное и выходное отверстия диффузора — круглые. К входному отверстию присоединен подводящий трубопровод, к выходному — прямоугольный элемент, имитирующий проточную часть аппарата (теплообменника, фильтра и т.п.) за диффузором.

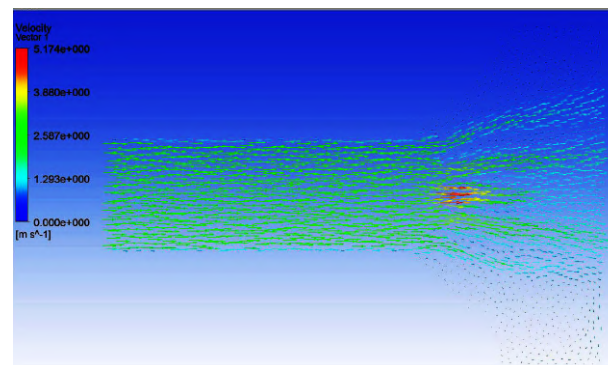
Основной целью данного исследования является теоретическая оценка влияния соотношения между



а



б



в

Рис. 2. Визуализация потока в коротком диффузоре для скорости $v = 2,82$ м/с с направляющими, выполненными:
1 — на всю длину диффузора;
2 — удлиненными; 3 — укороченными

осевыми размерами элементов проточной части короткого диффузора на его газодинамическую эффективность, то есть на величину потерь давления газового потока между входным и выходным сечениями диффузора и на равномерность распределения поля скоростей газового потока в выходном сечении диффузора.

Газодинамический расчет течения газа в коротком диффузоре осуществлялся на базе пакета ANSYS CFX, использующего метод конечных элементов. Как и в предыдущих расчетах короткого диффузора [15–16], расчет рассматриваемых объектов проходил в несколько этапов:

1. Подготовка расчетной модели:

а) создание геометрической модели объекта, а также моделей потоков, описывающих расчетную область;

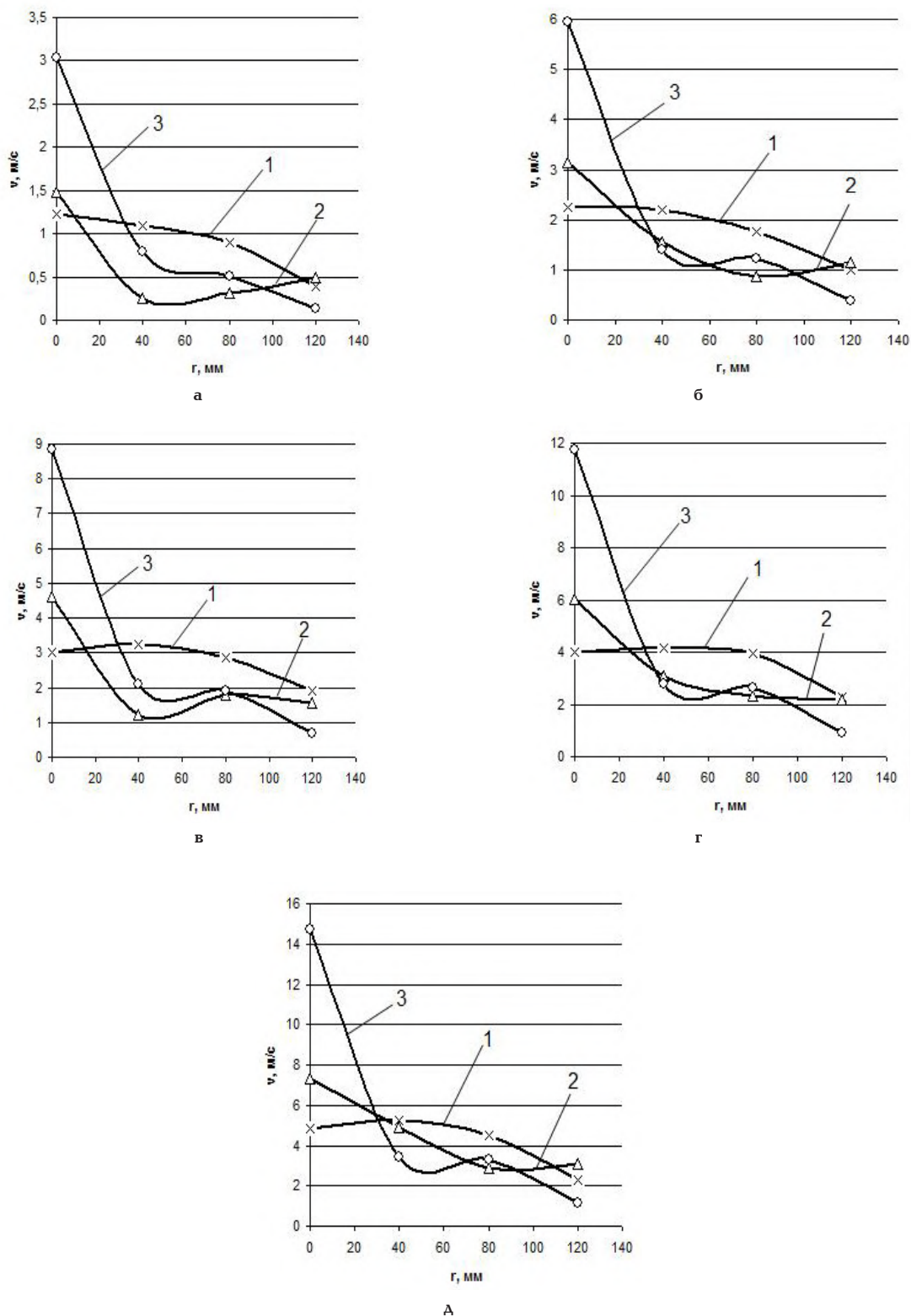


Рис. 3. Профиль скоростей, построенный на выходе из диффузора по радиусу выходного сечения для скорости потока: а — $v = 2,82$ м/с; б — $v = 5,64$ м/с; в — $v = 8,46$ м/с; г — $v = 11,28$ м/с; А — $v = 14,1$ м/с; 1 — направляющие во всю длину диффузора; 2 — удлиненные направляющие; 3 — укороченные направляющие

б) генерация сеточной модели на основе созданной геометрии;

в) задание граничных и начальных условий — препроцессинг.

2. Решение задачи в решателе.

3. Просмотр результатов расчета — постпроцессинг.

Основные результаты расчетов представлены на рис. 2–4.

Анализ профилей скоростей (рис. 3), построенных при различных скоростях потока, показал, что наиболее благоприятная картина течения на выходе из диффузора достигается при установке направляющих во всю длину диффузора, позволяя получить

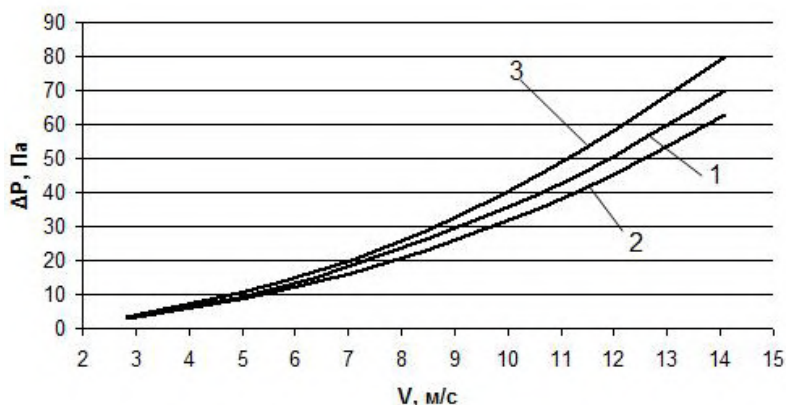


Рис. 4. Зависимость потерь давления от скорости потока в коротком диффузоре с направляющими, выполненными: 1 — на всю длину диффузора; 2 — удлинненными; 3 — укороченными

достаточно равномерное поле скоростей за большей частью выходного сечения.

Удлинение направляющих с заходом в подводящий трубопровод приводит к выраженному росту скорости потока в центральной части диффузора, что сравнимо с полем скоростей в случае без направляющих. Применение укороченных направляющих приводит к скачкообразному росту скорости потока в центральной части, что является неприемлемым с учетом требований, предъявляемых к направляющим.

Если оценивать различные варианты с точки зрения гидравлических потерь (рис. 4), то можно отметить, что все три варианта обладают качественно схожими газодинамическими характеристиками, при этом вариант с удлинненными направляющими обеспечивает наименьшие потери, что связано с более плавным переходом потока от прямолинейного участка трубы к диффузорной части.

Таким образом, наиболее предпочтительными являются варианты с длиной направляющих, равной или превышающей длину диффузора. Дальнейший параметрический анализ этих схем позволит оценить возможность снижения потерь давления при длине направляющих равной длине диффузора и возможность обеспечения более равномерного поля скоростей в выходном сечении диффузора при удлинённых направляющих.

Библиографический список

1. Филькин, Н. Ю. Исследование течения потока газа в диффузорах с различными конструктивными соотношениями / Н. Ю. Филькин // Техника и технология современного нефтехимического и нефтегазового производства : материалы III науч.-техн. конф. В 2 кн. Кн. 2. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. — С. 57–61.
2. Влияние неравномерности поля скоростей воздуха по фронту конденсатора на работу холодильного агрегата / С. Р. Гопин [и др.] // Холодильная техника. — 1979. — № 4. — С. 25–29.
3. Зеликовский, И. Х. Малые холодильные машины и установки : справочник / И. Х. Зеликовский, Л. Г. Каплан. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Агропромиздат, 1989. — 672 с.
4. Пат. 2469214 Российская Федерация, МКП F 04 D 29/44, F 04 D 29/54, F 03 B 11/00. Диффузор / А. Е. Зарянкин, С. В. Арианов; заявитель и патентообладатель ООО «Турбо-ЗАР». — № 2010128979/06; заявл. 14.07.10; опубл. 20.01.12. Бюл. № 34. — 8 с.
5. A. Mariotti, A.N. Grozescu, G. Buresti, M.V. Salvetti. Separation control and efficiency improvement in a 2D diffuser by means of contoured cavities. *Eur. J. Mech. B/Fluids*, 41 (2013), pp. 138–149.
6. Зарянкин, А. Е. Некоторые пути повышения аэродинамической нагрузки на диффузорные элементы турбомашин / А. Е. Зарянкин, В. Г. Грибин, А. Н. Парамонов // Известия АН СССР. — 1989. — Вып. 2. — С. 40–44.
7. Пат. 2032812 Российская Федерация, МКП F 01 D 25/30, F 15 D 1/08. Широкоугольный диффузор / А. Е. Зарянкин [и др.]; заявитель и патентообладатель Московский энергетический институт — № 5030043/06; заявл. 27.02.92; опубл. 10.04.95, Бюл. № 24.
8. B. Sahin, A.J. Ward-Smith. The use of perforated plates to control the flow emerging from a wide-angle diffuser, with application to electrostatic precipitator design. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 8 (1987), pp. 124–131.
9. M.N. Noui-Mehidi, J. Wu and I. Sutalo. Velocity distribution in an asymmetric diffuser with perforated plates. *Proceedings of 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, the University of Sydney, Australia*, 13–17 December. 2004.
10. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1992. — 672 с.
11. Пат. 2384760 Российская Федерация, МКП F 15 D 1/00. Диффузор / И. Ф. Пивин; заявитель и патентообладатель И. Ф. Пивин. — № 2008149803/06; заявл. 18.12.08; опубл. 20.03.10, Бюл. № 8. — 5 с.
12. А. с. 664101 СССР, МКИ2 G 01 P 5/00, G 01 F 1/00. Устройство для спрямления профиля скоростей потока жидкости / М. Л. Фрисман [и др.] (СССР); заявитель и патентообладатель Всесоюзное научно-производственное объединение целлюлозно-бумажной промышленности. — № 2521250/18-10; заявл. 05.09.77; опубл. 25.09.79, Бюл. № 19. — 2 с.
13. Пат. 2079843 Российская Федерация, МКП G 01 P 5/00. Устройство для спрямления профиля скорости потока жидкости / Г. А. Бочков, В. Г. Глазов; заявитель и патентообладатель Опытное конструкторское бюро «Гидропресс». — № 94033557/28; заявл. 13.09.94; опубл. 20.05.97, Бюл. № 17.
14. Пат. 129175 Российская Федерация, МКП F 15 D 1/00. Диффузор / В. А. Юша, Н. Ю. Филькин, Н. А. Райковский; заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. — № 2012136170/06; заявл. 21.08.12; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17. — 5 с.
15. Юша, В. А. Теоретический анализ эффективности применения коротких диффузоров в компактных теплообменниках / В. А. Юша, Н. Ю. Филькин, А. А. Шилунова // Динамика систем, механизмов и машин. — 2014. — № 2. — С. 162–167.

16. Исследование эффективности применения коротких диффузоров в компактных теплообменниках / В. Л. Юша, Н. Ю. Филькин, В. К. Васильев, А. А. Шипунова // Проблемы региональной энергетики. – 2014. – № 3 (26). – С. 46–52.

ФИЛЬКИН Николай Юрьевич, аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), декан нефтехимического института, заведующий кафедрой «Холодильная и компрессорная техника и технология».

ВАСИЛЬЕВ Владимир Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

ЛИХОБАБИНА Екатерина Александровна, аспирантка кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

Адрес для переписки: finick@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 08.09.2015 г.

© Н. Ю. Филькин, В. Л. Юша, В. К. Васильев,

Е. А. Лихобабина

Книжная полка

621.56/P13

Рабочие вещества технологического и низкотемпературного оборудования : учеб. пособие / А. В. Зиновьева [и др.]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – 130 с.

Приведены сведения о термодинамических свойствах различных рабочих веществ низкотемпературной, вакуумной и компрессорной техники, классификация и обозначение, а также требования, предъявляемые к рабочим веществам.

Рекомендовано студентам, обучающимся по направлениям подготовки «Технологические машины и оборудование» и «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения», при выполнении расчетов различных низкотемпературных, вакуумных и компрессорных установок, а также выпускной квалификационной работы.

621.941/B58

Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар : моногр. / В. С. Кушнер [и др.] ; под ред. И. А. Иванова, В. С. Кушнера. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – 221 с.

Монография посвящена вопросам исследования влияния структуры колесной стали на эксплуатационные свойства, а также вопросам исследования условий эксплуатации и ремонта колесных пар подвижного состава путем восстановления профиля токарной обработки. Рассмотрены вопросы, касающиеся увеличения ресурса колесных пар.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических сотрудников предприятий и научно-исследовательских организаций, работающих в области проектирования и эксплуатации подвижного состава, а также для преподавателей, аспирантов и студентов механических факультетов вузов.

621.5/Я60

Январев, И. А. Технология автоматизированного проектирования компрессорных, холодильных и технологических установок : [Электронный ресурс] : конспект лекций / И. А. Январев. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – 1 о^эл. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены различные аспекты и виды обеспечения систем автоматизированного проектирования, необходимые квалифицированным пользователям САПР в области компрессорной, холодильной техники и технологических установок. Значительное внимание уделено математическому обеспечению процедур анализа и синтеза проектных решений. Кроме основ теории и проектирования, студенты могут ознакомиться с основными тенденциями и новыми программными средствами расчета отдельных конструктивных решений и технологических схем различных установок, в частности ANSYS и HYSYS.

Для студентов, обучающихся по специальностям 150801 «Вакуумная и компрессорная техника физических установок», 140401 «Техника и физика низких температур», 240100 «Химическая технология и биотехнология», 240801 «Машины и аппараты химических производств».

621.9-52/K62

Кольцов, А. Г. Управление станками и станочными комплексами : [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Г. Кольцов. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – 1 о^эл. опт. диск (CD-ROM).

В конспекте лекций приведены основные темы лекционного курса дисциплины «Управление станками и станочными комплексами». Приведены теоретические основы систем автоматического управления, числового программного управления, представлены элементы конструкций станков с ЧПУ.

Конспект лекций предназначен для студентов специальности 151002 всех форм обучения.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ

В статье рассматриваются результаты исследования влияния концентрации наномодификаторов и температуры на характеристики механических свойств нанокompозита на основе ПТФЭ; показано, что при повышении температуры на 150°C характеристики механических свойств монотонно снижаются в 3–6,5 раза.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, двуокись кремния, скрытокристаллический графит, политетрафторэтилен.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе ПТФЭ хорошо зарекомендовали себя при эксплуатации в узлах трения машин в широком интервале температур. ПКМ, работающие в условиях трения, испытывают различного вида напряжения и значительные деформации, приводящие к возникновению и накоплению дефектов, структурно-фазовым превращениям и изменению физико-механических свойств. Установлено, что в объеме образцов при одноосном и других видах нагружения и деформации, а также при фрикционном взаимодействии в поверхностных слоях твердых тел происходят однотипные структурно-фазовые изменения, приводящие к постепенному накоплению микродефектов и разрушению (изнашиванию) поверхностей трения [1, 2]. Поэтому одной из основных задач при синтезе новых полимерных композиционных материалов триботехнического назначения является улучшение характеристик механических и триботехнических свойств, с целью повышения срока эксплуатации полимерных деталей при работе в широком диапазоне температур.

Для сравнительного анализа механических характеристик разрабатываемых материалов были выбраны ПКМ с различным наполнителем-модификатором, содержащим: полидисперсный порошок СКГ с концентрацией 8 % масс. и многослойные углеродные нанотрубки (УНТ) марки Graphistrength фирмы Arkemas концентрацией 2 % масс.; полидисперсный порошок СКГ с концентрацией 8 % масс. и наноразмерный порошок диоксида кремния марки БС-120 с концентрацией 2 % масс. Все образцы изготавливались по известной технологии методом

холодного прессования и свободного спекания при температуре 360 °С.

Исследования механических свойств композиционных материалов: предела прочности при растяжении σ_b , модуля упругости при растяжении E и относительного удлинения при разрыве ϵ проводились на разрывной машине «Zwick/Roell» по ГОСТ 14359-69 «Пластмассы. Методы испытания на растяжение» и ГОСТ 25.601-80 «Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах».

Автоматизированная машина разрывная «ZwickRoell» позволяет получать графические зависимости в координатах «усилие – деформация» при увеличении нагрузки до момента разрушения (разрыва) образца. Образцы изготавливали из заготовок в виде колец прямоугольного сечения методом штамповки в специальном вырубном штампе. Методика исследований предусматривала проведение серии испытаний для четырех образцов каждого состава ПКМ при скорости деформации растяжения 50 мм/мин. Системы измерений и автоматизированная обработка обеспечивают получение данных с погрешностью не более 5 %. График зависимости величины деформации от усилия растяжения показан на рис. 1.

Сравнительный анализ результатов исследования механических свойств ПКМ с наполнителями различной природы (табл. 1) показывает, что разрабатываемый ПКМ с порошкообразным наномодификатором БС-120 имеют практически

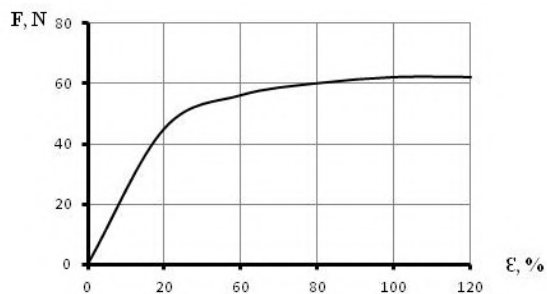


Рис. 1. График зависимости относительной деформации композиционного материала от усилия растяжения

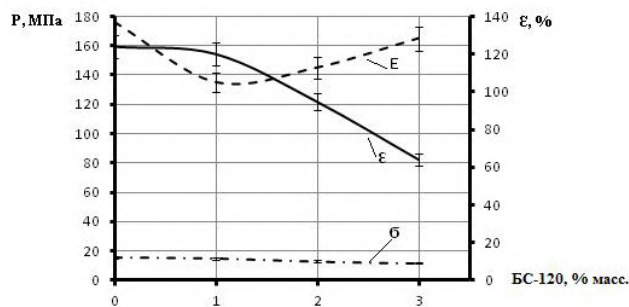


Рис. 2. Концентрационные зависимости механических характеристик ПКМ: E — модуль упругости, МПа; σ — предел прочности, МПа; ϵ — относительное удлинение, %.

Таблица 1

Характеристики механических свойств ПТФЭ-композитов

Состав ПКМ	σ_b , МПа	E, МПа	ϵ , %
СКГ — 8%, УНТ — 2,0%, ПТФЭ — 90%	15,3	158	137
СКГ — 8%, БС-120 — 2,0%, ПТФЭ — 90%	15,6	105	113

одинаковый предел прочности σ_b с наноккомпозитом на основе ПТФЭ в состав которого входят (УНТ). При этом модуль упругости E и относительное удлинение ϵ композита с волокнистым наномодификатором (УНТ) имеют более высокие значения на 50,4 % и 21,2 % соответственно. В то же время использование углеродных наноматериалов связано с определенными затруднениями. УНТ образуют конгломераты, препятствующие равномерному распределению нанотрубок в матрице, они упаковываются в плотные жгуты, состоящие из параллельно расположенных одиночных трубок, что значительно снижает эффективность структурной модификации. Установлено [3], что степень однородности ПКМ, содержащего УНТ, существенно зависит от их концентрации. С ростом концентрации более негативно проявляется жгутовая структура УНТ, поскольку между жгутами, по-разному ориентированными в полимерной матрице, образуется свободное пространство, заполненное полимером. Следует отметить, что более низкое значение E не является недостатком ПКМ, поскольку, например, при использовании композита для изготовления уплотняющих элементов трибосистем снижение эластичности материала способствует повышению степени герметичности уплотнений.

На основании ранее выполненных работ объектом исследования выбран композиционный материал на основе ПТФЭ модифицированный комплексным наполнителем — модификатором в состав которого входит полидисперсный порошок скрытокристаллического графита марки ГЛС-3 в количестве 8 % масс., а также наноразмерный порошок SiO_2 марки БС-120 в количестве от 1 % масс. до 3 % масс.

По результатам испытаний построены концентрационные зависимости модуля упругости при растяжении E, предела прочности при разрушении σ_b и относительного удлинения при разрыве ϵ (рис. 2). Установлено, что с увеличением concentra-

ции наноразмерного компонента SiO_2 марки БС-120 в количестве 3 % масс, в комплексном наполнителе, предел прочности и относительное удлинение снижаются, а модуль упругости повышается.

В ряде работ [4, 5] проводилось исследование влияния температуры окружающей среды на физико-механические свойства ПКМ на основе ПТФЭ. Анализ результатов названных исследований показывает, что с повышением температуры предел прочности и модуль упругости полимерных композитов значительно снижаются. Эта закономерность сохраняется в широком интервале температур от минус 180°C до плюс 200°C. В качестве наполнителей ранее исследованных ПКМ использовались измельченное углеродное волокно, дисперсные порошки дисульфида молибдена, бронзы и оксидов свинца [6].

В данной работе проводилось исследование температурных зависимостей характеристик механических свойств ПТФЭ-композитов с комплексным наполнителем-модификатором. В состав модификатора входят: полидисперсный порошок скрытокристаллического графита марки ГЛС-3 в количестве 8 % масс., а также наноразмерный порошок SiO_2 марки БС-120 в количестве 3 % масс.

Методика предусматривала исследование образцов при комнатной температуре, а также при температурах: плюс 60°C, 90°C, 120°C, 150°C и 180°C. При каждой температуре испытывали по четыре образца и определяли средние значения исследуемых параметров.

Средние значения исследуемых параметров представлены в табл. 2. По результатам испытаний построены графики температурных зависимостей механических свойств ПКМ с комплексным наполнителем — на рис. 3. Анализ результатов температурных исследований показывает снижения механических характеристик, а также сравнительно невысокие значения модуля упругости исследуемого ПКМ, особенно при повышенных температурах,

Температурные характеристики механических свойств ПКМ

№ п/п	Температура испытания	σ_{br} , МПа	E, МПа	ϵ , %
1	25	16,5	167	136
2	60	11,7	106	156
3	90	9,0	75,8	140
4	120	7,3	75	136
5	150	5,7	55,3	124
6	180	5,1	25	118

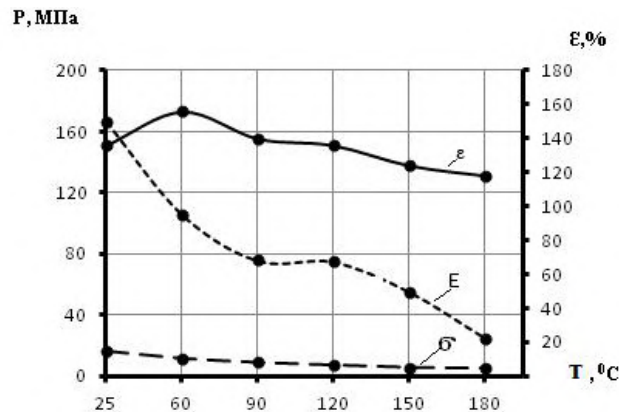


Рис. 3. Температурные зависимости механических свойств ПКМ:
 ϵ — относительное удлинение, %; E — модуль упругости, МПа;
 σ — предел прочности, МПа.

что предопределяет целесообразность и эффективность применения ПТФЭ-композита для изготовления уплотнительных элементов герметизирующих устройств. В то же время значительное уменьшение предела прочности при растяжении ПКМ с повышением температуры (рис. 3) снижает эффективность применения ПТФЭ-композита с комплексным модификатором в высоконагруженных трибосопряжениях, а также в узлах трения, работающих при высоких температурах.

Заключение

1. Повышение температуры окружающей среды от комнатной (25°C) до 180°C приводит к монотонному снижению предела прочности при растяжении σ_{br} более чем в три раза, модуля упругости — более чем в 6,5 раза и относительного удлинения — на 13,2 %.

2. В интервале температур 90–120°C модуль упругости практически не изменяется; для выяснения физических причин особенностей полученных температурных зависимостей необходимо дополнительное исследование надмолекулярной структуры ПКМ и структурно-фазовых превращений.

Библиографический список

1. Машков, Ю. К. Повышение эксплуатационных свойств композитов на основе ПТФЭ. Ч. I. Влияние состава и вида наполнителей на структуру и свойства композитов / Ю. К. Машков, Л. Ф. Калистратова, А. Н. Леонтьев // Трение и износ. — 2002. — Т. 23, № 2. — С. 181–187.
2. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю. К. Машков [и др.]. — М.: Недра, 2004. — 262 с.

3. Влияние углеродных модификаторов на структуру и износостойкость полимерных нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена / О. В. Кропотин [и др.] // Журнал технической физики. — 2014. — № 5 (84). — С. 66–70.

4. Машков, Ю. К. Влияние температуры на структуру и триботехнические свойства наполненного политетрафторэтилена / Ю. К. Машков // Трение и износ. — 1997. — Т. 17, № 1. — С. 108–113.

5. Машков, Ю. К. Исследование температурных зависимостей физико-механических свойств композитных материалов на основе политетрафторэтилена / Ю. К. Машков, В. С. Зябликов, В. М. Казанцев // Механика композитных материалов. — 1991. — № 1. — С. 20–25.

6. Машков, Ю. К. Создание полимерного антифрикционного нанокомпозита на основе политетрафторэтилена с повышенной износостойкостью / Ю. К. Машков, О. В. Кропотин, О. А. Кургузова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 86–88.

ЧЕМИСЕНКО Олег Владимирович, аспирант кафедры физики Омского государственного технического университета.

КОСАРЕНКО Роман Иванович, кандидат технических наук, доцент (Россия), начальник кафедры «Вооружение танков и стрельбы» Омского автобронетанкового инженерного института.

МАКИЕНКО Владимир Алексеевич, преподаватель кафедры «Вооружение танков и стрельбы» Омского автобронетанкового инженерного института.
 Адрес для переписки: Larker95@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.09.2015 г.

© О. В. Чемисенко, Р. И. Косаренко, В. А. Макиенко

АНАЛИЗ ВОСПРИЯТИЯ ГРАФИЧЕСКОГО ОБРАЗА СТРАНИЦЫ ПЕЧАТНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ЦВЕТНОЙ ПОДЛОЖКЕ

В статье рассматриваются вопросы, относящиеся к созданию привлекательного и удобочитаемого внешнего графического облика страницы печатных публикаций. Оценка графического образа страницы производится по одному из существенных параметров — контрасту. Показано изменение контраста графического образа страницы при использовании в качестве подложки цветной бумаги. Приводятся результаты экспертной оценки восприятия графического образа печатных публикаций, выполненных на различных цветных бумагах.

Ключевые слова: графический образ страницы, печатные публикации, контраст, насыщенность текстового набора, метод оценки насыщенности текстового набора печатных публикаций, цветная подложка.

Одним из важнейших показателей, определяющих привлекательность внешнего облика страницы печатной публикации и удобочитаемость размещенного на ней текста, является контраст.

Контраст графического образа страницы текстового документа определяется наличием и соотношением на странице белого (фон, поля), серого (основной текст) и черного (заголовки, выделения жирным шрифтом, графические элементы, изображения) пространств (при использовании цветных решений — светлого, среднего по светлоте и темного).

Поскольку основного текста на странице всегда больше, серое пространство является самым значительным фактором, определяющим контраст публикации.

В общем случае контраст графического образа страницы печатных и электронных публикаций определяется как

$$K = H_{om} - H_z,$$

где K — контраст страницы публикации;

H_{om} — насыщенность текстового набора основного текста (единицы уровня яркости — ед. ур. ярк.);

H_z — насыщенность текстового набора заголовка (ед. ур. ярк.).

Насыщенность текстового набора не может быть измерена приборно, поскольку оттенок серого цвета, создаваемый блоком текста, как параметр применим только к значительной площади (порядка кв. дм; для сравнения апертура фотометра имеет порядок кв. мм). В Омском государственном техническом университете разработан и апробирован программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций [1–4].

Сущность метода заключается в оценке оттенка серого цвета, создаваемого текстовым набором посредством показателя — уровень яркости (изменяющегося от 0 до 255 единиц), определяемого с помощью инструмента «Гистограмма» в программе для обработки изображений Photoshop. В импортированном в программу изображении страницы текста выделяют произвольную прямоугольную область площадью не менее 100 000 пикселей и, используя фильтр «Размытие» — «Среднее», осуществляют размытие выделенной области, в результате чего она приобретает однородный по площади оттенок серого цвета. После этого считывают значение уровня яркости («Среднее»).

В [5, 6] описывается методика оценки контраста печатных публикаций.

Для определения оптимального контраста графического образа страницы печатной публикации

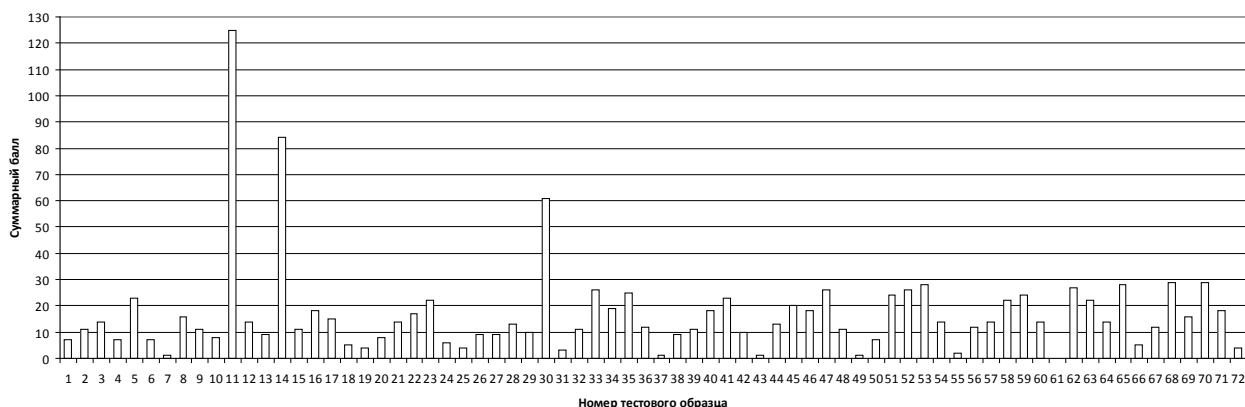


Рис. 1. Диаграмма экспертной оценки печатных публикаций (тестовых образцов) на белой подложке [6]

Таблица 1

Характеристики бумаги, использованной в качестве подложки

№ п/п	Марка бумаги, плотность (г/м ²)	Цвет	Координаты цвета		
			L*	a*	b*
1	Maestro color, серия неон (80)	Оранжевый	87,46	35,00	75,11
2	Maestro color, серия неон (80)	Зеленый	95,55	-40,85	81,69
3	Maestro color, серия неон (80)	Желтый	96,32	-23,55	90,62
4	Maestro color, серия неон (80)	Розовый (светлый пурпурный)	86,87	52,80	12,11

формируют 72 варианта тестовых страниц с различным соотношением насыщенности набора заголовка (H_z) и основного текста ($H_{от}$). Заголовки и текст набираются шрифтами гарнитуры Франклин Готик (Franklin Gothic) различных начертаний и кеглей. Указанная гарнитура выбирается именно в силу того, что содержит значительное количество начертаний.

Оценка контраста печатных публикаций осуществляется на основе визуального восприятия тестовых образцов с использованием метода экспертной оценки. Наиболее целесообразным вариантом такой оценки является вариант сравнительной оценки нескольких образцов, предъявляемых одновременно, с последующим выбором образца, производящего наиболее благоприятное визуальное впечатление.

Если использовать балльный метод оценки при последовательном предъявлении образцов возникает проблема памяти сохранения экспертом зрительных образов наилучших образцов (при их значительном количестве) с целью выявления наилучшего среди примерно равных по зрительному восприятию. В этой связи, а также в связи с тем, что количество образцов достаточно велико — 72 (и их одновременная оценка затруднена), для оценки контраста печатных публикаций и установления его оптимального значения из общего массива образцов формируются 12 групп, содержащих по 6 тестовых образцов.

В каждую группу входят образцы с основным текстом, одинаковым по размеру и насыщенности шрифта, и заголовком, одинаковым по размеру шрифта, но различной насыщенности. Между собой группы отличаются насыщенностью основного текста и размером шрифта заголовка.

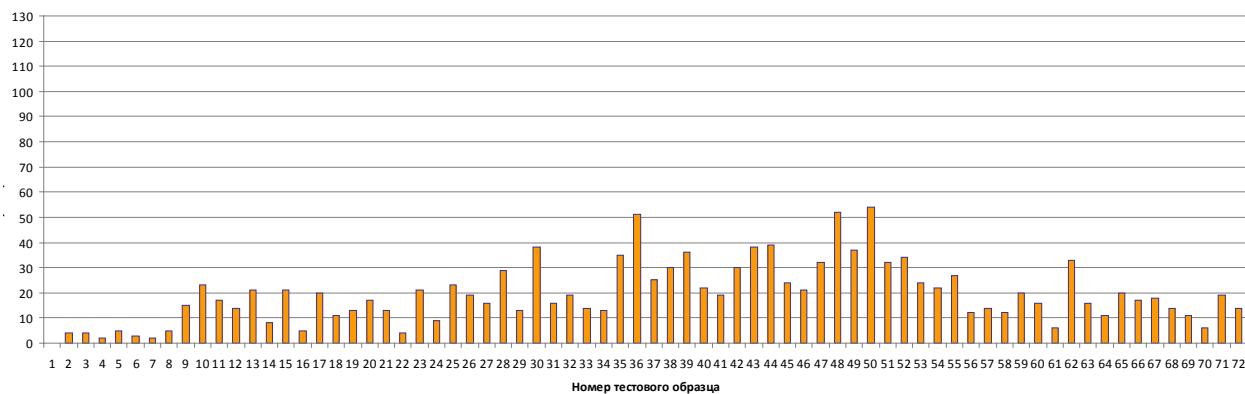
Описываемая оценка осуществляется в три этапа: отборочный тур, полуфинальный тур, финальный тур.

Выбранному (одному из шести) в каждой группе на первом этапе образцу присваивается ранг величиной в один балл, невыбранным образцам — ноль баллов.

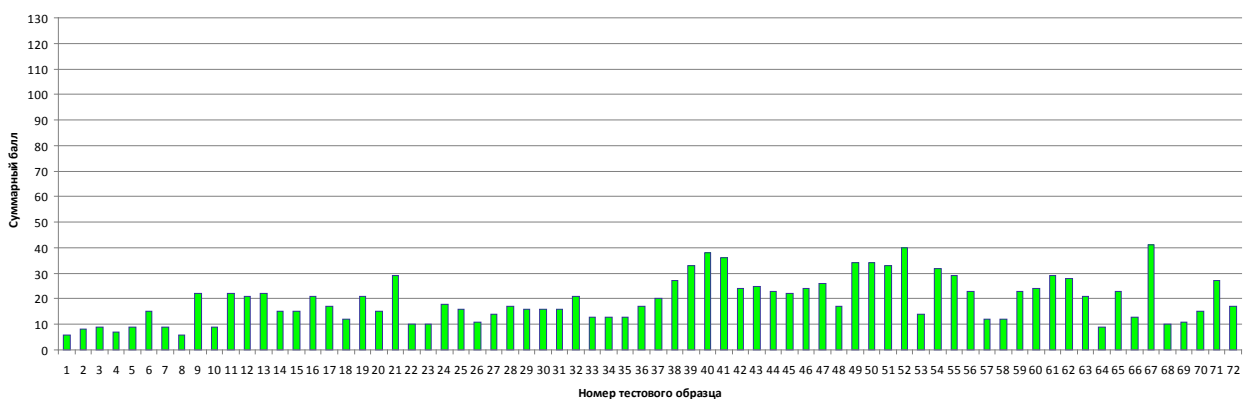
Из двенадцати выбранных в отборочном туре образцов формируются две группы. Первые шесть образцов формируют первую группу, остальные — вторую. В каждой группе снова выбирается один — наиболее привлекательный образец.

Выбранному образцу присваивается ранг величиной в два балла, невыбранным образцам — ноль баллов. В итоге остается по одному образцу из каждой полуфинальной группы. Из них эксперт выбирает наиболее привлекательный по оформлению образец. Ему присваивается ранг величиной в четыре балла.

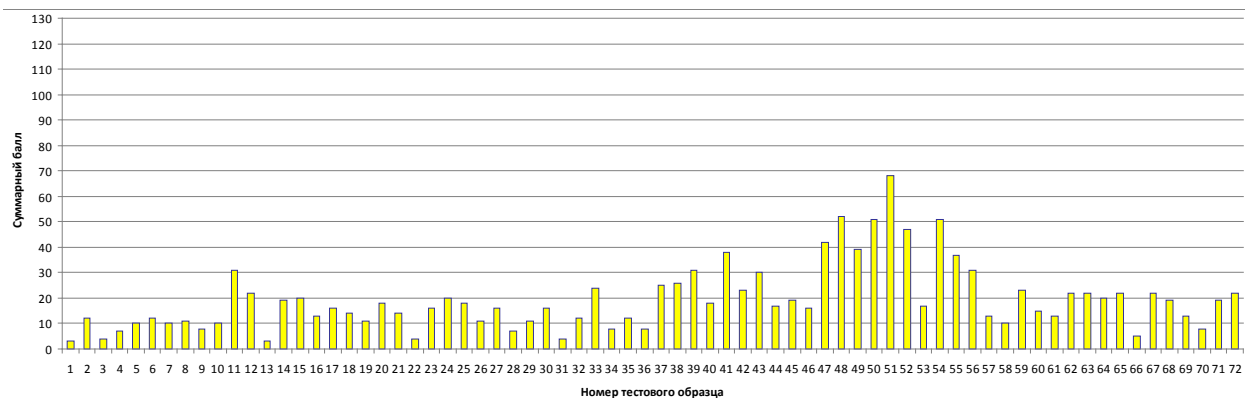
Для каждого тестового образца подсчитывается сумма набранных баллов и на основе полученных результатов выбираются тестовые образцы с наибольшими суммарными рангами, значительно превышающими суммарные ранги остальных.



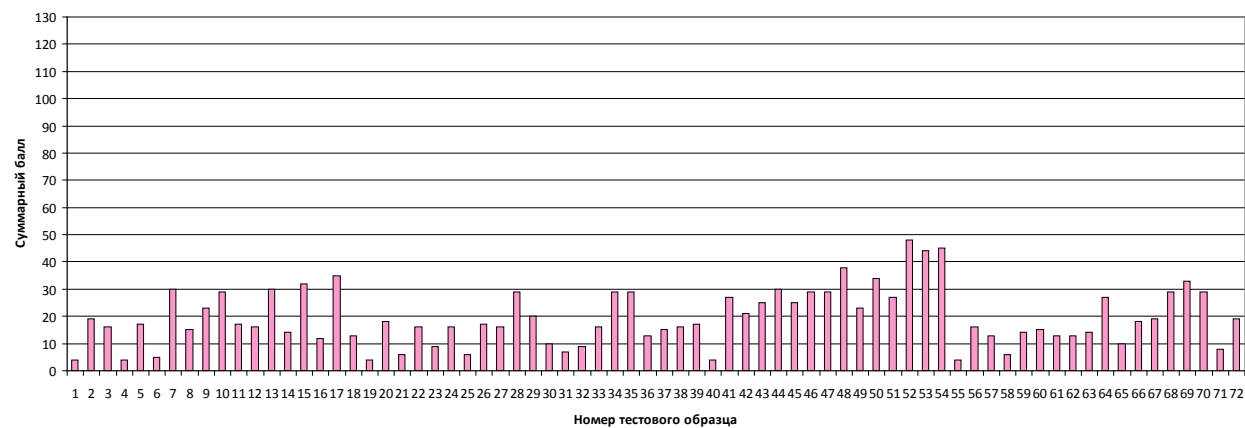
а



б



в



г

Рис. 2. Диаграммы экспертной оценки печатных публикаций (тестовых образцов) на цветных подложках:
а — оранжевой, б — зеленой, в — желтой, г — розовой

Таблица 2

Насыщенность (H) текстового набора основного текста и заголовка (единица уровня яркости) и контраст (K) наилучших тестовых образцов печатных публикаций, распечатанных на оранжевой подложке

Место	Номер образца	Суммарный ранг	Параметры набора	H_{cp}	K , ед. ур. ярк.
1	50	54	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее)	159,49	9,29
			заголовок (кегель 20 пт, начертание полужирное)	150,2	
2	48	52	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее)	157,23	41,63
			заголовок (кегель 16 пт, начертание темное)	115,6	
3	36	51	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное узкое)	160,46	15,66
			заголовок (кегель 20 пт, начертание темное)	144,8	

Таблица 3

Насыщенность (H) текстового набора основного текста и заголовка (единица уровня яркости) и контраст (K) наихудших тестовых образцов печатных публикаций, распечатанных на оранжевой подложке

Номер образца	Суммарный ранг	Параметры набора	H_{cp}	K , ед. ур. ярк.
1	0	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	161,80	40,57
		заголовок (кегель 12 пт, начертание полужирное)	121,23	
4	2	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	162,50	11,66
		заголовок (кегель 12 пт, начертание полужирное узкое)	150,84	
7	2	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	162,23	43,08
		заголовок (кегель 16 пт, начертание полужирное)	119,15	

Таблица 4

Насыщенность (H) текстового набора основного текста и заголовка (единица уровня яркости) и контраст (K) наилучших тестовых образцов печатных публикаций, распечатанных на зеленой подложке

Место	Номер образца	Суммарный ранг	Параметры набора	H_{cp}	K , ед. ур. ярк.
1	67	41	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее узкое)	148,9	11,58
			заголовок (кегель 20 пт, начертание полужирное)	137,32	
2	52	40	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее)	148,33	8,43
			заголовок (кегель 20 пт, начертание полужирное узкое)	139,9	
3	40	38	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее)	148,5	8,7
			заголовок (кегель 12 пт, начертание полужирное узкое)	139,8	

Насыщенность (H) текстового набора основного текста и заголовка (единица уровня яркости) и контраст (K) наихудших тестовых образцов печатных публикаций, распечатанных на зеленой подложке

Номер образца	Суммарный ранг	Параметры набора	H_{cp}	K , ед. ур. ярк.
1	6	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	159,60	19,87
		заголовок (кегель 12 пт, начертание полужирное)	139,73	
8	6	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	159,89	20,83
		заголовок (кегель 16 пт, начертание полужирное)	139,06	
4	7	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	160,30	21,3
		заголовок (кегель 12 пт, начертание узкое)	139	

Таблица 6

Насыщенность (H) текстового набора основного текста и заголовка (единица уровня яркости) и контраст (K) наилучших тестовых образцов печатных публикаций, распечатанных на желтой подложке

Место	Номер образца	Суммарный ранг	Параметры набора	H_{cp}	K , ед. ур. ярк.
1	51	68	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее)	169,36	16,97
			заголовок (кегель 20 пт, начертание полужирное узкое)	152,39	
2	48	52	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее)	167,89	22,36
			заголовок (кегель 16 пт, начертание темное)	145,53	
3	50	51	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее)	167,16	8,63
			заголовок (кегель 20 пт, начертание полужирное)	158,53	

Таблица 7

Насыщенность (H) текстового набора основного текста и заголовка (единица уровня яркости) и контраст (K) наихудших тестовых образцов печатных публикаций, распечатанных на желтой подложке

Номер образца	Суммарный ранг	Параметры набора	H_{cp}	K , ед. ур. ярк.
1	3	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	174,92	20,06
		заголовок (кегель 12 пт, начертание полужирное)	154,86	
13	3	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	175,85	21,64
		заголовок (кегель 20 пт, начертание полужирное)	154,21	
3	4	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	174,36	21,23
		заголовок (кегель 12 пт, начертание полужирное узкое)	153,13	

Насыщенность (H) текстового набора основного текста и заголовка (единица уровня яркости) и контраст (K) наилучших тестовых образцов печатных публикаций, распечатанных на розовой подложке

Место	Номер образца	Суммарный ранг	Параметры набора	H_{cp}	K , ед. ур. ярк.
1	52	48	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее)	176,79	14,65
			заголовок (кегель 20 пт, начертание полужирное узкое)	162,14	
2	54	45	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее)	177,27	24,58
			заголовок (кегель 20 пт, начертание темное)	152,69	
3	53	44	основной текст (кегель 10 пт, начертание среднее)	175,74	23,45
			заголовок (кегель 20 пт, начертание темное)	152,29	

Таблица 9

Насыщенность (H) текстового набора основного текста и заголовка (единица уровня яркости) и контраст (K) наихудших тестовых образцов печатных публикаций, распечатанных на розовой подложке

Номер образца	Суммарный ранг	Параметры набора	H_{cp}	K , ед. ур. ярк.
1	4	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	184,9	18,9
		заголовок (кегель 12 пт, начертание полужирное)	166	
4	4	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное)	182,14	16,65
		заголовок (кегель 12 пт, начертание полужирное узкое)	165,49	
19	4	основной текст (кегель 10 пт, начертание книжное узкое)	180,51	14,51
		заголовок (кегель 12 пт, начертание полужирное)	166	

В экспериментах по определению оптимального контраста графического образа страницы [5, 6] участвовало 70 экспертов. Результаты экспертной оценки образцов, отпечатанных на белой бумаге, приведены на рис. 1. Коэффициент конкордации W (общий коэффициент ранговой корреляции для группы, состоящей из 70 экспертов) в проведенных исследованиях равен 0,67, что говорит о высокой степени согласованности мнений экспертов.

Проведенные исследования показали, что оптимальный контраст графического образа страницы печатной публикации должен составлять 50–60 единиц уровней яркости [5, 6].

Проведенные исследования и типографическая практика показывают, что публикации с высоким контрастом воспринимаются во всех отношениях лучше малоконтрастных. Наиболее приемлемым и удобным для чтения остается черный текст на белом фоне. Однако на сегодняшний день для реализации различных дизайнерских решений широко используются цветные подложки.

Цель настоящих исследований — оценка восприятия печатных публикаций, выполненных на различных цветных подложках (табл. 1), экспертами с последующим выбором образца, производящего наиболее благоприятное визуальное впечатление.

Оценка производилась с использованием методики, разработанной в [5, 6], а насыщенность текстового набора определялась с использованием модернизированного программно-инструментального метода определения насыщенности текстового набора [7, 8].

Результаты экспертной оценки приведены на рис. 2, а насыщенность (H) текстового набора основного текста и заголовка (единица уровня яркости) и контраст (K) наилучших и наихудших с точки зрения восприятия тестовых образцов печатных публикаций, распечатанных на различных подложках, в табл. 2–9.

Коэффициент конкордации W (70 экспертов) в проведенных исследованиях равен 0,94, 0,94, 0,53,

0,69 соответственно для оценок печатных образцов, выполненных на оранжевой, зеленой, желтой и розовой подложках, что говорит о высокой степени согласованности мнений экспертов.

На основании анализа экспериментальных данных не установлено корреляции между контрастом печатных публикаций, выполненных на цветных подложках, и позитивной оценкой графического образа. Экспертами оцениваются как производящие наиболее благоприятное визуальное впечатление образцы с меньшим контрастом и наоборот. В некоторых случаях имеет место перекрестная оценка.

Следовательно, цвет подложки является фактором специфического влияния на визуальное восприятие печатного текста помимо контраста, определяемого на основе только яркостных показателей.

Таким образом, требуются дальнейшие исследования, направленные на разработку новых дополнительных показателей оценки графического образа печатных публикаций, учитывающих цветовые дизайнерские решения, а также на усовершенствование соответствующих методик.

Библиографический список

1. Сысуев, И. А. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора электронных публикаций / И. А. Сысуев // Динамика систем, механизмов, машин : матер. VII междунар. науч.-техн. конф. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2009. — С. 327—330.
2. Григорова, Ю. С. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных публикаций / Ю. С. Григорова, О. А. Зырянова, И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко // Полиграфия: технология, оборудование, материалы : материалы заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — С. 54—58.
3. Воробьева, А. С. Насыщенность текстового набора электронных публикаций / А. С. Воробьева, И. А. Сысуев // Полиграфия: технология, оборудование, материалы : материалы заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — С. 39—45.
4. Воробьева, А. С. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций / А. С. Воробьева, Ю. С. Григорова, О. А. Зырянова, И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 2 (90). — С. 228—231.

5. Сысуев, И. А. Определение оптимального контраста графического образа страницы печатных публикаций / И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко, Ю. С. Григорова // Динамика систем, механизмов, машин : материалы VIII междунар. науч.-техн. конф. В 2 кн. Кн. 1. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. — С. 282—285.

6. Сысуев, И. А. Определение оптимального контраста графического образа страницы печатных и электронных публикаций / И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко, Ю. С. Григорова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 328—331.

7. Сысуев, И. А. Исследование влияния цвета бумаги на насыщенность графического образа страницы печатных публикаций / И. А. Сысуев, Е. А. Державина, И. В. Пруд // Инновационные решения при реструктуризации логистических систем : материалы заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Омск, 2014. — С. 49—52.

8. Сысуев, И. А. Влияние цвета бумаги на насыщенность текстового набора и контраст графического образа страницы печатных публикаций / И. А. Сысуев, И. В. Пруд, Е. А. Державина, О. Е. Сердюк, В. В. Скитченко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — Омск, 2015. — № 1 (137). — С. 107—109.

СЫСУЕВ Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии полиграфического производства».

ПРУД Ирина Валерьевна, магистрант гр. ТПМ-141 факультета элитного образования и магистратуры.

СЕРДЮК Ольга Евгеньевна, студентка гр. ТП-121 нефтехимического института.

СКИТЧЕНКО Виктория Викторовна, студентка гр. ТП-121 нефтехимического института.

ВАСИЛЕВИЧ Ксения Витальевна, студентка гр. ТП-121 нефтехимического института.

ЕПИФАНЦЕВА Кристина Александровна, студентка гр. ТП-131 нефтехимического института.

ФЕДОРЧУК Марина Фёдоровна, ведущий инженер научного издательства, магистрант гр. ТПМ-151. Адрес для переписки: sia1960@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.09.2015 г.

© И. А. Сысуев, И. В. Пруд, О. Е. Сердюк, В. В. Скитченко, К. В. Василевич, К. А. Епифанцева, М. Ф. Федорчук

Книжная полка

655.3/Л64

Литунов, С. Н.

Защита печатной продукции от подделки : учеб. пособие по профилю «Технология полиграфического производства» направления 261700.62 «Технология полиграфического и упаковочного производства» при изучении дисциплины «Защита печатной продукции от подделки» / С. Н. Литунов; ОмГТУ. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. — 99 с.

Приведены способы защиты печатной продукции от подделки в порядке, определяемом технологическими процессами получения печатной продукции. Предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению «Технология полиграфического и упаковочного производства».

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ НАСЫЩЕННОСТИ ТЕКСТОВОГО НАБОРА ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ЦВЕТНОЙ ПОДЛОЖКЕ

В статье рассматриваются вопросы, относящиеся к созданию привлекательного и удобочитаемого внешнего графического облика страницы печатных публикаций. Оценка графического образа страницы производится по одному из существенных параметров — контрасту. Приводится усовершенствованный программно-инструментальный метод оценки насыщенности текстового набора печатных публикаций, позволяющий учитывать цвет подложки (бумаги). Показано изменение контраста графического образа страницы при использовании цветной бумаги.

Ключевые слова: графический образ страницы, печатные публикации, контраст, насыщенность текстового набора, метод оценки насыщенности текстового набора печатных публикаций, цветная подложка.

Возможности современной печатной техники и разнообразие запечатываемых материалов позволяют реализовать различные дизайнерские решения. При работе с цветными подложками специалисту необходимо подобрать оптимальное соотношение начертаний шрифта, кегля, интерлиньяжа и величины трекинга, так как от этого зависит насыщенность текстового набора и, как следствие, контраст и качество восприятия.

На сегодняшний день оценка типографического оформления текста на цветной бумаге (подложке) проводится визуально и субъективно. Зачастую можно встретить малоконтрастные публикации.

В Омском государственном техническом университете был разработан программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций с использованием инструментария программы для обработки изображений Adobe Photoshop [1–4], а совместно с коллегами из Белорусского государственного технологического университета — основанный на вышеуказанном методе способ определения степени заполнения полосы набора текстом [5, 6].

Изначально сущность метода определения насыщенности заключалась в оценке оттенка серого

цвета, создаваемого текстовым набором, посредством показателя «уровень яркости» (0–255), определяемого с помощью инструмента «Гистограмма» в программе для обработки изображений Adobe Photoshop. Последующая модернизация метода заключалась в использовании текстового тест-образца, содержащего такие количества символов русского текста, включая межсловные пробелы, которые соответствуют частоте их встречаемости. Это позволило сделать метод универсальным и избавило от необходимости выбирать в качестве образцов конкретные тексты для исследования [7].

Цель настоящих исследований заключалась в модернизации и проверке работоспособности усовершенствованного программно-инструментального метода — для изучения влияния цвета бумаги (подложки) на насыщенность текстового набора.

Описываемое усовершенствование метода заключается в сканировании печатного текста не в 8-битовом режиме (256 оттенков серого цвета), а в 24-битовом режиме с использованием цветовой модели RGB, поскольку предполагается исследование насыщенности текстового набора, отпечатанного на цветных подложках.

Метод определения насыщенности текстового набора, отпечатанного на цветной подложке,

включает в себя последовательность нижеприведенных операций:

1. Набор текста в прикладной программе.
2. Распечатка текста на лазерном принтере с разрешением 1200 точек на дюйм с параметрами печати по умолчанию [1–3].
3. Сканирование текста с разрешением 300 выборок на дюйм [4] в 24-битовом режиме (цветовая модель RGB).
4. Импорт отсканированного изображения в формате TIFF в программу для обработки изображений Adobe Photoshop.
5. Определение показателей оценки насыщенности текстового набора.

Для определения параметра «уровень яркости» выделяют на странице текста произвольную прямоугольную область площадью не менее 100 000 пикселей (контроль размера осуществляется по показателю «Пиксели» в окне «Гистограмма») и, используя фильтр «Размытие» — «Среднее», осуществляют размытие выделенной области, в результате чего она приобретает однородный по площади оттенок цвета подложки. Значение уровня яркости («Среднее») считывают в окне «Гистограмма» — канал RGB (цвета).

Для обеспечения статистической достоверности определяемых значений показателей измерения повторяют 10 раз, всякий раз выбирая новую произвольную область.

Среднее арифметическое значение результатов измерений H_{cp} рассчитывают: $H_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$, где n — количество измерений; H_i — результат i -го измерения, а среднеквадратичное отклонение S_H :

$$S_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{cp} - H_i)^2}{n \times (n - 1)}}.$$

Формирование тестового образца текстового набора среднестатистического русскоязычного текста производилось согласно [7].

Вначале изготавливались тестовые образцы набора единичных символов с параметрами набора, указанными в табл. 1 (всего использовано 70 символов — строчные и прописные символы русского алфавита (66 символов), а также наиболее часто встречающиеся пунктуационные и орфографические знаки: точка, запятая, дефис и межсловный пробел).

Тестовые образцы текстового набора среднестатистического русскоязычного текста формировались путем набора единичных символов на полосе тестового образца и соответствующих расчетов [7].

Полученные тестовые образцы набора единичных символов и текстового набора среднестатистического русскоязычного текста распечатывались на лазерном принтере (п. 2 вышеприведенного метода) на различных по цвету бумагах (табл. 2), сканировались (п. 3), импортировались в формате TIFF в программу для обработки изображений Adobe Photoshop.

Определение насыщенности текстового набора, созданного единичными символами, производилось согласно [8, 9]. Данные измерений были сгруппированы в таблицы, аналогичные табл. 3.

Расчет математически ожидаемой (предполагаемой) насыщенности H_p текстового набора универсального тест-объекта (образца текстового набора среднестатистического русскоязычного текста) производился

$$H_p = \frac{\sum_{i=1}^{70} (L_i \times P_i)}{\sum_{i=1}^{70} P_i},$$

где L_i — насыщенность единичного символа (текстового набора, созданного единичными символами), P_i — частота встречаемости i -го символа.

В ходе исследования рассчитаны значения математически ожидаемой (предполагаемой) насы-

Таблица 1

Параметры текстового набора тестовых образцов печатных публикаций

	Гарнитура шрифта	Начертание	Кегль, пт	Интерлиньяж, пт
1	Таймс	прямое светлое	10	11
2	Таймс	прямое полужирное	14	15

Таблица 2

Характеристики бумаги, использованной в качестве подложки

№ п/п	Марка бумаги, плотность (г/м ²)	Цвет	Координаты цвета		
			L*	a*	b*
1	Svetocopy (80)	Белый	99,70	−0,35	2,96
2	Maestro color, серия neon (80)	Оранжевый	87,46	35,00	75,11
3	Maestro color, серия neon (80)	Зеленый	95,55	−40,85	81,69
4	Maestro color, серия neon (80)	Желтый	96,32	−23,55	90,62
5	Maestro color, серия neon (80)	Розовый (светлый пурпурный)	86,87	52,80	12,11

Количество символов тестового образца среднестатистического текста на русском языке, набранного шрифтом гарнитуры Таймс прямого светлого начертания кегля 10 пт с интерлиньяжем 11 пт, распечатанного на цветной (розовой) подложке и его предполагаемая насыщенность

Символ	Насыщенность L_i единичного символа, усл. ед.	Частота P_i встречаемости символа	$L_i \times P_i$	Количество $k_{i,п.л.}$ символов на полосе тестового образца
1	2	3	4	5
а	173,683	0,06143	10,66935	437,87
б	168,056	0,01369	2,300687	97,58232
в	174,248	0,03329	5,800716	237,2911
г	182,28	0,01460	2,661288	104,0688
д	175,489	0,02376	4,169619	169,3613
е	182,576	0,06915	12,62513	492,9012
ё	171,912	0,00001	0,001719	0,07128
ж	172,045	0,00952	1,637868	67,85856
з	175,678	0,01355	2,380437	96,5844
и	174,9	0,05827	10,19142	415,3486
й	169,424	0,00813	1,377417	57,95064
к	171,081	0,02777	4,750919	197,9446
л	178,671	0,03675	6,566159	261,954
м	175,417	0,02449	4,295962	174,5647
н	177,529	0,05115	9,080608	364,5972
о	177,162	0,08962	15,87726	638,8114
п	176,166	0,01937	3,412335	138,0694
р	169,357	0,03275	5,546442	233,442
с	182,773	0,04106	7,504659	292,6757
т	182,258	0,04976	9,069158	354,6893
у	178,86	0,02247	4,018984	160,1662
ф	164,546	0,00075	0,12341	5,346
х	179,306	0,00705	1,264107	50,2524
ц	174,266	0,00216	0,376415	15,39648
ч	179,48	0,01306	2,344009	93,09168
ш	178,78	0,00623	1,113799	44,40744
щ	175,725	0,00331	0,58165	23,59368
ъ	173,388	0,00021	0,036411	1,49688
ы	178,84	0,01440	2,575296	102,6432
ь	176,003	0,01576	2,773807	112,3373
э	179,802	0,00212	0,38118	15,11136
ю	174,875	0,00545	0,953069	38,8476
я	174,271	0,01659	2,891156	118,2535
.	198,563	0,01003	1,991587	71,49384
,	193,818	0,02104	4,077931	149,9731
-	194,077	0,00181	0,351279	12,90168
пробел	208,936	0,15488	32,360	1103,985

ценности H_p текстового набора универсального тест-объекта (образца) печатных публикаций двух сочетаний вариантов начертания, кегля шрифта, интерлиньяжа (табл. 1).

Измерение насыщенности $H_{изм}$ текстового набора универсального тест-объекта (образца) среднестатистического русскоязычного текста печатных

публикаций производилось также согласно [8, 9]. При этом область выделения составляла всю полосу набора целиком. Данные измерений, а также среднестатистические отклонения между расчетными H_p и экспериментально определенными значениями $H_{изм}$ насыщенности текстового набора представлены в табл. 4.

1	2	3	4	5
А	180,507	0,00082	0,148016	5,84496
Б	168,682	0,00039	0,065786	2,77992
В	168,772	0,00134	0,226154	9,55152
Г	180,362	0,00067	0,120843	4,77576
Д	169,387	0,00072	0,121959	5,13216
Е	170,721	0,00030	0,051216	2,1384
Ё	169,196	0,00000	0	0
Ж	170,245	0,00016	0,027239	1,14048
З	172,564	0,00028	0,048318	1,99584
И	171,816	0,00170	0,292087	12,1176
Й	164,249	0,00033	0,054202	2,35224
К	172,087	0,00066	0,113577	4,70448
Л	175,342	0,00064	0,112219	4,56192
М	171,332	0,00111	0,190179	7,91208
Н	172,495	0,00141	0,243218	10,05048
О	174,468	0,00114	0,198894	8,12592
П	173,057	0,00076	0,131523	5,41728
Р	172,955	0,00071	0,122798	5,06088
С	173,181	0,00085	0,147204	6,0588
Т	181,154	0,00079	0,143112	5,63112
У	181,805	0,00021	0,038179	1,49688
Ф	182,393	0,00011	0,020063	0,78408
Х	175,637	0,00010	0,017564	0,7128
Ц	171,551	0,00012	0,020586	0,85536
Ч	175,213	0,00024	0,042051	1,71072
Ш	172,345	0,00008	0,013788	0,57024
Щ	173,156	0,00000	0	0
Ъ	174,671	0,00000	0	0
Ы	178,77	0,00000	0	0
Ь	173,564	0,00000	0	0
Э	175,719	0,00033	0,057987	2,35224
Ю	174,128	0,00000	0	0
Я	170,892	0,00024	0,041014	1,71072
Суммарный показатель		0,991651	180,943	
Расчетная (предполагаемая) насыщенность текстового набора тестового образца			182,466	

Примечание. Общее количество символов на полосе тестового образца 7128

Указанные данные показывают, что расчетная математически ожидаемая (предполагаемая) насыщенность и насыщенность, измеренная с помощью модернизированного программно-инструментального метода, хорошо согласуются: отклонение расчетных и экспериментально определенных значений не превышает 5,12 усл. ед., что составляет 2,94 %.

Полученные результаты подтверждают работоспособность модернизированного программно-инструментального метода определения насыщенности текстового набора для печатных публикаций, выполненных на цветной подложке.

На основании анализа экспериментальных данных было установлено, что насыщенность тексто-

вого набора при использовании цветной подложки снижается на 45–90 единиц по сравнению с белой бумагой (табл. 4).

Из этого следует, что при работе с цветными подложками для получения требуемых значений контраста необходимо увеличивать насыщенность текстового набора за счет изменения кегля шрифта, интерлиньяжа и начертания.

Библиографический список

1. Сысуйев, И. А. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора электронных публикаций / И. А. Сысуйев // Динамика систем, механизмов,

**Насыщенность текстового набора печатной публикации
среднестатистического русскоязычного текста, полученного с различными параметрами**

№ п/п	Гарнитура	Начертание	Кегль, пт	Интерлиньяж, пт	Насыщенность текстового набора		Среднестатистическое отклонение, усл. ед.
					расчетная (H_p), усл. ед.	измеренная ($H_{изм}$), усл. ед.	
Белая подложка							
1	Таймс	прямое светлое	10	11	224,05	227,01	2,96
2	Таймс	прямое полужирное	14	15	217,56	218,08	0,52
Оранжевая подложка							
3	Таймс	прямое светлое	10	11	156,81	155,50	1,31
4	Таймс	прямое полужирное	14	15	152,94	151,66	1,28
Зеленая подложка							
5	Таймс	прямое светлое	10	11	162,39	161,04	1,35
6	Таймс	прямое полужирное	14	15	141,89	140,70	1,19
Желтая подложка							
7	Таймс	прямое светлое	10	11	179,08	174,35	4,73
8	Таймс	прямое полужирное	14	15	174,16	169,04	5,12
Розовая подложка							
9	Таймс	прямое светлое	10	11	182,47	182,67	0,21
10	Таймс	прямое полужирное	14	15	179,49	177,09	2,40

машин : матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2009. — С. 327—330.

2. Григорова, Ю. С. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных публикаций / Ю. С. Григорова, О. А. Зырянова, И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко // Полиграфия: технология, оборудование, материалы : матер. заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — С. 54—58.

3. Воробьева, А. С. Насыщенность текстового набора электронных публикаций / А. С. Воробьева, И. А. Сысуев // Полиграфия: технология, оборудование материалы : матер. заоч. науч.-практ. конф. с между. участием. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — С. 39—45.

4. Воробьева, А. С. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций / А. С. Воробьева, Ю. С. Григорова, О. А. Зырянова, И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 2 (90). — С. 228—231.

5. Пат. 17388 Белоруссия, МПК G 01 D 21/00. Способ определения степени заполнения полосы набора текстом / Косова М. М., Зильберглеит М. А., Токарь О. В., Сысуев И. А., Григорова Ю. С., Тимошенко О. А. ; заявитель и патентообладатель Белорус. гос. технолог. ун-т. — № а 20110681 ; заявл. 17.05.2011 ; опубл. 30.08.2013. — 3 с.

6. Пат. 17390 Белоруссия, МПК G 01 D 21/00. Способ определения степени заполнения полосы набора текстом / Косова

М. М., Зильберглеит М. А., Токарь О. В., Сысуев И. А., Григорова Ю. С., Тимошенко О. А. ; заявитель и патентообладатель Белорус. гос. технолог. ун-т. — № а 20110943 ; заявл. 07.07.2011 ; опубл. 30.08.2013. — 3 с.

7. Сысуев, И. А. Тестовый образец среднестатистического русскоязычного текста для определения насыщенности текстового набора электронных и печатных публикаций / И. А. Сысуев, И. В. Пруд, Е. А. Державина, М. В. Вдовина // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 2 (140). — С. 138—143.

8. Сысуев, И. А. Исследование влияния цвета бумаги на насыщенность графического образа страницы печатных публикаций / И. А. Сысуев, Е. А. Державина, И. В. Пруд // Инновационные решения при реструктуризации логистических систем : матер. заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Омск, 2014. — С. 49—52.

9. Сысуев, И. А. Влияние цвета бумаги на насыщенность текстового набора и контраст графического образа страницы печатных публикаций / И. А. Сысуев, И. В. Пруд, Е. А. Державина, О. Е. Сердюк, В. В. Скитченко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 1 (137). — С. 107—109.

СЫСУЕВ Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии полиграфического производства».

ПРУД Ирина Валерьевна, магистрант гр. ТПМ-141 факультета элитного образования и магистратуры.
СЕРДЮК Ольга Евгеньевна, студентка гр. ТП-121 нефтехимического института.
СКИТЧЕНКО Виктория Викторовна, студентка гр. ТП-121 нефтехимического института.
ВАСИЛЕВИЧ Ксения Витальевна, студентка гр. ТП-121 нефтехимического института.
ЕПИФАНЦЕВА Кристина Александровна, студентка гр. ТП-131 нефтехимического института.

ФЕДОРЧУК Марина Федоровна, ведущий инженер научного издательства, магистрант гр. ТПМ-151. Адрес для переписки: sia1960@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.09.2015 г.

© И. А. Сысуев, И. В. Пруд, О. Е. Сердюк,
В. В. Скитченко, К. В. Василевич, К. А. Епифанцева,
М. Ф. Федорчук

УДК 621.311.001

Н. П. БАДАЛЯН
А. А. МИТРОФАНОВ
Е. А. ЧАЩИН
Л. И. ШЕМАНЕВА

Владимирский государственный
университет
им. А. Н. и Н. Г. Столетовых
Ковровская государственная
технологическая академия
им. В. А. Дегтярева

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ α , β СОПРЯЖЁННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОРРЕКЦИЕЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

Предложен метод построения математических моделей α , β сопряженных ЭЭС при коррекции установившегося режима электроэнергетической системы сочетанием теоремы Телледжена и декомпозиции-диакоптики.

Ключевые слова: коррекция, теорема, система, узел, ветвь, схема, параметр, ток, напряжение.

В основе теории расчетов установившихся режимов для больших электроэнергетических систем (ЭЭС) лежат подходы, сформированные в конце 50-х – начале 60-х годов XX века, основанные на решении систем нелинейных уравнений итерационным методом [1–6]. В этом случае любое изменение начальных условий, вызывает необходимость повторного решения всей системы нелинейных алгебраических уравнений. Последнее связано с большими затратами машинного времени, т.к. каждая итерация изменения начальных условий рассматривается как самостоятельная задача анализа установившегося режима. Этот подход не всегда оправдан, особенно для случаев, когда требуется быстро определить отклик системы с распределенными параметрами, на небольшое возмущение, которое осуществляется, например, с целью коррекции установившегося режима ЭЭС. Один из путей снижения затрат машинного времени заключается в коррекции установившегося режима ЭЭС [7]. В этом случае на основании положений теоремы Телледжена [8, 9] рассматриваются, помимо заданной исходной ЭЭС, рассмотреть ещё две α и β со-

пряженные ЭЭС. В настоящей работе рассмотрен метод построения математических моделей α , β сопряженных ЭЭС при коррекции установившегося режима ЭЭС, сочетанием теоремы Телледжена и декомпозиции-диакоптики.

Рассмотрим расчет установившегося режима α сопряженной ЭЭС. Будем считать, что в исходной ЭЭС из-за изменения продольных комплексных сопротивлений действуют новые напряжения \dot{U}_i и \dot{U}_b и токи \dot{I}_i , \dot{I}_b в узлах и ветвях. Тогда, относительно α сопряженной системы имеем выражения в виде [10–11].

$$\dot{U}_i^\alpha + \frac{\dot{U}_i}{I_i} \hat{I}_i^\alpha = \hat{U}_i^\alpha + \frac{\dot{U}_i}{I_i} \dot{I}_i^\alpha = 0;$$

...

$$\dot{U}_{in}^\alpha + \frac{\dot{U}_{in}}{I_{in}} \hat{I}_{in}^\alpha = \hat{U}_{in}^\alpha + \frac{\dot{U}_{in}}{I_{in}} \dot{I}_{in}^\alpha = 0.$$

$$\dot{U}_l^\alpha + \frac{\dot{U}_l}{I_l} \hat{I}_l^\alpha = \hat{U}_l^\alpha + \frac{\dot{U}_l}{I_l} \dot{I}_l^\alpha = 1.$$

Перепишем уравнения (1) и (2) в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_{i_1}^\alpha &= -\frac{\hat{U}_{i_1}}{\hat{I}_{i_1}} \hat{I}_{i_1}^\alpha; \\ \dots \\ U_{i_N}^\alpha &= -\frac{\hat{U}_{i_N}}{\hat{I}_{i_N}} \hat{I}_{i_N}^\alpha; \\ U_l^\alpha &= -\frac{\hat{U}_l}{\hat{I}_l} \hat{I}_l^\alpha + 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Принимаем, что

$$Z_{i_1} = \frac{\hat{U}_{i_1}}{\hat{I}_{i_1}}, \dots, Z_{i_N} = \frac{\hat{U}_{i_N}}{\hat{I}_{i_N}}, Z_l = \frac{\hat{U}_l}{\hat{I}_l}. \quad (4)$$

Тогда с учетом подстановки (4) выражения (3) примет вид:

$$\begin{aligned} U_{i_1}^\alpha &= -Z_{i_1} \hat{I}_{i_1}^\alpha; \\ \dots \\ U_{i_N}^\alpha &= -Z_{i_N} \hat{I}_{i_N}^\alpha; \\ U_l^\alpha &= -Z_l \hat{I}_l^\alpha + 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Как было показано нами ранее [11], узел с индексом l находится в первой подсистеме, поэтому выражения (5) удобно представить в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{i_1}^\alpha \\ \hat{U}_{i_2}^\alpha \\ \dots \\ \hat{U}_{i_N}^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_{i_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -Z_{i_2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -Z_{i_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{I}_{i_1}^\alpha \\ \hat{I}_{i_2}^\alpha \\ \dots \\ \hat{I}_{i_N}^\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + j0 \\ 0 + j0 \\ \dots \\ 0 + j0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где в первом верхнем блоке все элементы соответствующим индексу $i_i (i \neq l)$ равняются нулю и только элемент с индексом l равен $1 + j0$.

Для сопряженной ЭЭС было принято, что ее продольные элементы равняются соответствующим продольным элементам исходной ЭЭС, поэтому уравнения отдельных подсистем можно представить:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{i_1}^\alpha &= Z_{i_1 j_1} \dot{I}_{i_1}^\alpha \\ \dots \\ \dot{U}_{i_N}^\alpha &= Z_{i_N j_N} \dot{I}_{i_N}^\alpha, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\dot{U}_{i_1}^\alpha, \dots, \dot{U}_{i_N}^\alpha$ являются искомыми многомерными комплексными напряжениями, $\dot{I}_{i_1}^\alpha, \dots, \dot{I}_{i_N}^\alpha$ — искомыми многомерными комплексными токами, $Z_{i_1 j_1}, \dots, Z_{i_N j_N}$ — являются квадратными матрицами узловых комплексных сопротивлений подсистем i_1, \dots, i_N . Отметим, что эти сопротивления составлены относительно единственного базисного узла, который был обозначен индексом "0". С учетом сделанных замечаний, систему уравнений (7) а сопряженной ЭЭС можно представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{i_1}^\alpha \\ \dot{U}_{i_2}^\alpha \\ \dots \\ \dot{U}_{i_N}^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{i_1 j_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{i_2 j_2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{i_N j_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{I}_{i_1}^\alpha \\ \hat{I}_{i_2}^\alpha \\ \dots \\ \hat{I}_{i_N}^\alpha \end{bmatrix}, \quad (8)$$

В результате получили два матричных уравнения (6) и (8) для определения неизвестных многомерных векторов $\dot{U}_{i_1}^\alpha, \dot{U}_{i_2}^\alpha, \dots, \dot{U}_{i_N}^\alpha$ и $\hat{I}_{i_1}^\alpha, \hat{I}_{i_2}^\alpha, \dots, \hat{I}_{i_N}^\alpha$. Предполагая, что исходная схема ЭЭС представляется в виде радиально связанных оптимальных подсистем [6], матричное уравнение (8) в развернутой форме можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{i_1}^\alpha &= \dot{U}_{B_{i_1}} + Z_{i_1 j_1} \dot{I}_{i_1}^\alpha \\ \dots \\ \dot{U}_{i_N}^\alpha &= \dot{U}_{B_{i_N}} + Z_{i_N j_N} \dot{I}_{i_N}^\alpha \\ \dot{U}_{B_{i_1}} &= \dot{U}_B + Z_{i_1 M_1} \cdot \Delta \dot{I}_{1N} + \Delta Z_{i_1 S_1} \dot{I}_\gamma \\ \dots \\ \dot{U}_{B_{i_N}} &= \dot{U}_B + Z_{i_N M_N} \cdot \Delta \dot{I}_{NN} + \Delta Z_{i_N S_N} \dot{I}_\gamma \end{aligned} \quad (9)$$

где \dot{U}_B — напряжение единственного базисного узла для всей системы в целом; \dot{U}_{M_1} — напряжение узла M_1 первой подсистемы, к которому примыкает вторая подсистема; \dot{U}_{M_N} — напряжение узла M_N N -ной подсистемы к которому примыкает последняя подсистема; $Z_{i_1 M_1}, \dots, Z_{i_N M_N}$ — последние столбцы матриц $Z_{i_1 j_1}, \dots, Z_{i_N j_N}$; $\Delta Z_{i_1 S_1}, \dots, \Delta Z_{i_N S_N}$ — являются комплексными сопротивлениями вновь полученных узлов из-за разрезания; \dot{I}_γ — многомерный вектор комплексных токов разрезанных линий и определяется по выражению:

$$\dot{I}_\gamma = (Z_{l\delta} - Z_{лЭП})^{-1} \Delta \dot{U}_j. \quad (10)$$

С другой стороны, комплексное сопротивление $Z_{l\delta}$ определяется по формуле:

$$Z_{l\delta} = (Z_{l\gamma} - Z_{lS}) - (Z_{\delta\gamma} - Z_{\delta S}). \quad (11)$$

В выражении (10) $Z_{l\delta}$ является диагональной матрицей, элементы которой являются комплексными сопротивлениями отключенных ЛЭП:

$$Z_{лЭП} = \begin{bmatrix} Z_{лЭП}^1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{лЭП}^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{лЭП}^L \end{bmatrix}. \quad (12)$$

$$\Delta \dot{U}_j = \Delta \dot{U}_{j_1} + \dots + \Delta \dot{U}_{j_N}. \quad (13)$$

Токи $\Delta \dot{I}_{2N}, \Delta \dot{I}_{3N}, \dots, \Delta \dot{I}_{i_N}$ определяются с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{2N} &= \sum_{M_2} \dot{I}_{i_2} + \sum_{M_3} \dot{I}_{i_3} + \dots + \sum_{M_N} \dot{I}_{i_N} \\ \Delta \dot{I}_{3N} &= \sum_{M_3} \dot{I}_{i_3} + \sum_{M_4} \dot{I}_{i_4} + \dots + \sum_{M_N} \dot{I}_{i_N}. \end{aligned} \quad (14)$$

...

$$\Delta \dot{I}_{NN} = 0$$

Таким образом, относительно \dot{U}_i^α и \dot{I}_i^α для $i=i_1, i_2, \dots, i_N$ имеем следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{i_1}^\alpha = \dot{U}_{B_{i_1}} + Z_{i_1 j_1} \dot{I}_{i_1}^\alpha \\ \dot{U}_{i_1}^\alpha = -Z_{i_1} \hat{I}_{i_1}^\alpha + (1 + j0)_l \end{cases}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{i_2}^\alpha = \dot{U}_{B_{i_2}} + Z_{i_2 j_2} \dot{I}_{i_2}^\alpha \\ \dot{U}_{i_2}^\alpha = -Z_{i_2} \hat{I}_{i_2}^\alpha \end{cases}, \quad (16)$$

...

$$\begin{cases} \dot{U}_{i_N}^\alpha = \dot{U}_{Bi_N} + Z_{i_N j_N} \hat{I}_{i_N}^\alpha \\ \dot{U}_{i_N}^\alpha = -Z_{i_N} \hat{I}_{i_N}^\alpha \end{cases} \quad (17)$$

Представим (15), (16), ..., (17) в виде:

$$Z_{i_1} \hat{I}_{i_1}^\alpha + Z_{i_1 j_1} \hat{I}_{i_1}^\alpha = -\dot{U}_{Bi_1} + \dot{A}, \quad (18)$$

$$Z_{i_2} \hat{I}_{i_2}^\alpha + Z_{i_2 j_2} \hat{I}_{i_2}^\alpha = -\dot{U}_{Bi_2}, \quad (19)$$

...

$$Z_{i_N} \hat{I}_{i_N}^\alpha + Z_{i_N j_N} \hat{I}_{i_N}^\alpha = -\dot{U}_{Bi_N}, \quad (20)$$

Матрица \dot{A} является столбовой матрицей с нулевыми элементами, кроме элемента строки с номером l , в которой записано комплексно число $1+j0$. Разлагая комплексные величины, входящие в (18–20), на действительные и мнимые составляющие и вновь объединяя относительно действительных величин, получим:

$$\begin{bmatrix} A_{i_1}^\alpha & \vdots & B_{i_1}^\alpha \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_1}^\alpha & \vdots & D_{i_1}^\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{i_1}^\alpha \\ \dots \\ I_{i_1}^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{Bi_1}' \\ \dots \\ -U_{Bi_1}'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+j0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} A_{i_2}^\alpha & \vdots & B_{i_2}^\alpha \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_2}^\alpha & \vdots & D_{i_2}^\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{i_2}^\alpha \\ \dots \\ I_{i_2}^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{Bi_2}' \\ \dots \\ -U_{Bi_2}'' \end{bmatrix}, \quad (22)$$

...

$$\begin{bmatrix} A_{i_N}^\alpha & \vdots & B_{i_N}^\alpha \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_N}^\alpha & \vdots & D_{i_N}^\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{i_N}^\alpha \\ \dots \\ I_{i_N}^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{Bi_N}' \\ \dots \\ -U_{Bi_N}'' \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Если $i_l = 1, 2, 3$ и $l = 2$, то матричное уравнение для этого частного случая принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_{11} & X_1 - X_{11} & R_{12} & -X_{12} & R_{13} & -X_{13} \\ R_{21} & -X_{21} & R_2 + R_{22} & X_2 - X_{22} & R_{23} & -X_{23} \\ R_{31} & -X_{31} & R_{32} & -X_{32} & R_3 + R_{33} & X_3 - X_{33} \\ X_1 + X_{11} & -R_1 + R_{11} & X_{12} & R_{12} & X_{13} & R_{13} \\ X_{21} & R_{21} & X_2 + X_{22} & -R_2 + R_{22} & X_{23} & R_{23} \\ X_{31} & R_{31} & X_{32} & R_{32} & X_3 + X_{33} & -R_3 + R_{33} \end{bmatrix} \div \begin{bmatrix} I_{i_1}^\alpha \\ I_{i_2}^\alpha \\ I_{i_3}^\alpha \\ I_{i_1}^\alpha \\ I_{i_2}^\alpha \\ I_{i_3}^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{B1}' \\ -U_{B2}' \\ -U_{B3}' \\ -U_{B1}'' \\ -U_{B2}'' \\ -U_{B3}'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1+j0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

В данном случае:

$$A_{i_1}^\alpha = \begin{bmatrix} R_1 + R_{11} & X_1 - X_{11} & R_{12} \\ R_{21} & -X_{21} & R_2 + R_{22} \\ R_{31} & -X_{31} & R_{32} \end{bmatrix};$$

$$B_{i_1}^\alpha = \begin{bmatrix} -X_{12} & R_{13} & -X_{13} \\ X_2 - X_{21} & R_{23} & -X_{23} \\ -X_{32} & R_3 + R_{33} & X_3 - X_{33} \end{bmatrix};$$

$$C_{i_1}^\alpha = \begin{bmatrix} X_1 + X_{11} & -R_1 + R_{11} & X_{12} \\ X_{21} & R_{21} & X_2 + X_{22} \\ X_{31} & R_{31} & X_{32} \end{bmatrix};$$

$$D_{i_1}^\alpha = \begin{bmatrix} R_{12} & X_{13} & R_{13} \\ -R_2 + R_{22} & X_{23} & R_{23} \\ R_{32} & X_3 + X_{33} & -R_3 + R_{33} \end{bmatrix}.$$

Устанавливая матричные уравнения (21–23), можем определить значения искоемых токов путем обращения соответствующих неособенных квадратных матриц, а именно:

$$\begin{bmatrix} I_{i_1}^\alpha \\ \dots \\ I_{i_1}^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{i_1}^\alpha & \vdots & B_{i_1}^\alpha \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_1}^\alpha & \vdots & D_{i_1}^\alpha \end{bmatrix}^{-1} \times \left(\begin{bmatrix} U_{Bi_1}' \\ \dots \\ U_{Bi_1}'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+j0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \right), \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} I_{i_2}^\alpha \\ \dots \\ I_{i_2}^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{i_2}^\alpha & \vdots & B_{i_2}^\alpha \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_2}^\alpha & \vdots & D_{i_2}^\alpha \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} U_{Bi_2}' \\ \dots \\ U_{Bi_2}'' \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} I_{i_N}^\alpha \\ \dots \\ I_{i_N}^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{i_N}^\alpha & \vdots & B_{i_N}^\alpha \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_N}^\alpha & \vdots & D_{i_N}^\alpha \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} U_{Bi_N}' \\ \dots \\ U_{Bi_N}'' \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Обращая матрицы, входящие в (25–27), блочным методом, определяем искоемые составляющие комплексных токов $I_{i_1}^\alpha, \dots, I_{i_N}^\alpha$ т.е. токи $I_{i_1}^\alpha, \dots, I_{i_N}^\alpha$ и $I_{i_1}^\alpha, \dots, I_{i_N}^\alpha$. Определяя комплексные токи $I_{i_1}^\alpha, \dots, I_{i_N}^\alpha$, переходим к определению комплексных напряжений $\dot{U}_{i_1}^\alpha, \dots, \dot{U}_{i_N}^\alpha$. Для этого должны пользоваться выражениями (9). Далее завершаем расчет установившегося режима, определяя комплексные узловые напряжения и токи β сопряженной ЭЭС.

Теперь рассмотрим построение математической модели установившегося режима β сопряженной ЭЭС. Согласно исследований, выполненных нами ранее [11], для β сопряженной ЭЭС удобно записать:

$$\dot{U}_{i_1}^\beta + \frac{\hat{U}_{i_1}}{I_{i_1}} \hat{I}_{i_1}^\beta = \hat{U}_{i_1}^\beta + \frac{\hat{U}_{i_1}}{I_{i_1}} \hat{I}_{i_1}^\beta = 0$$

$$\dots$$

$$\dot{U}_{i_N}^\beta + \frac{\hat{U}_{i_N}}{I_{i_N}} \hat{I}_{i_N}^\beta = \hat{U}_{i_N}^\beta + \frac{\hat{U}_{i_N}}{I_{i_N}} \hat{I}_{i_N}^\beta = 0 \quad (28)$$

$$\dot{U}_l^\beta + \frac{\hat{U}_l}{I_l} \hat{I}_l^\beta = \hat{U}_l^\beta + \frac{\hat{U}_l}{I_l} \hat{I}_l^\beta = 1. \quad (29)$$

Перепишем выражения (28–29) в виде:

$$\dot{U}_{i_1}^\beta = -\frac{\hat{U}_{i_1}}{I_{i_1}} \hat{I}_{i_1}^\beta$$

$$\dots$$

$$\dot{U}_{i_N}^\beta = -\frac{\hat{U}_{i_N}}{I_{i_N}} \hat{I}_{i_N}^\beta \quad (30)$$

$$\dot{U}_l^\beta = -\frac{\hat{U}_l}{I_l} \hat{I}_l^\beta + 1$$

Пользуясь обозначениями (4), перепишем выражение (30):

$$\dot{U}_{i_1}^\beta = -Z_{i_1} \hat{I}_{i_1}^\beta$$

$$\dots$$

$$\dot{U}_{i_N}^\beta = -Z_{i_N} \hat{I}_{i_N}^\beta \quad (31)$$

$$\dot{U}_l^\beta = -Z_l \hat{I}_l^\beta + 1$$

Тогда система уравнений (31) в матричной форме будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{i_1}^\beta \\ \dot{U}_{i_2}^\beta \\ \dots \\ \dot{U}_{i_N}^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{i_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{i_2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{i_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{i_1}^\beta \\ \dot{I}_{i_2}^\beta \\ \dots \\ \dot{I}_{i_N}^\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+j0 \\ 0+j0 \\ \dots \\ 0+j0 \end{bmatrix}, \quad (32)$$

где число $1+j0$ соответствует только строке с индексом i_1 , соответствующий узел которого находится в первой подсистеме. Поскольку продольные элементы β сопряженной ЭЭС равняются соответствующим продольным элементам исходной ЭЭС с обратными знаками, то систему уравнений можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{i_1}^\beta &= -Z_{i_1 j_1} \dot{I}_{i_1}^\beta \\ \dots & \\ \dot{U}_{i_N}^\beta &= -Z_{i_N j_N} \dot{I}_{i_N}^\beta \end{aligned}, \quad (33)$$

где $\dot{U}_{i_1}^\beta, \dots, \dot{U}_{i_N}^\beta$ являются искомыми многомерными комплексными напряжениями; $\dot{I}_{i_1}^\beta, \dots, \dot{I}_{i_N}^\beta$ — искомыми многомерными комплексными токами; $Z_{i_1 j_1}, \dots, Z_{i_N j_N}$ — квадратными матрицами узловых комплексных сопротивлений подсистем i_1, \dots, i_N .

В матричной форме уравнение установившегося режима β сопряженной ЭЭС является:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{i_1}^\beta \\ \dot{U}_{i_2}^\beta \\ \dots \\ \dot{U}_{i_N}^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{i_1 j_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{i_2 j_2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{i_N j_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{i_1}^\beta \\ \dot{I}_{i_2}^\beta \\ \dots \\ \dot{I}_{i_N}^\beta \end{bmatrix}. \quad (34)$$

Поскольку исходная система, как было показано выше, представляется в виде совокупности радикально связанных подсистем, то для β сопряженной ЭЭС можем написать следующие матричные уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{i_1}^\beta &= \dot{U}_{B i_1} - Z_{i_1 j_1} \dot{I}_{i_1}^\beta \\ \dots & \\ \dot{U}_{i_N}^\beta &= \dot{U}_{B i_N} - Z_{i_N j_N} \dot{I}_{i_N}^\beta \end{aligned}, \quad (35)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{U}_{B i_1} &= \dot{U}_B - Z_{i_1 M_1} \cdot \Delta \dot{I}_{2N} - \Delta Z_{i_1 S_1} \dot{I}_\gamma \\ \dot{U}_{B i_2} &= \dot{U}_{M_1} - Z_{i_2 M_2} \cdot \Delta \dot{I}_{3N} - \Delta Z_{i_2 S_2} \dot{I}_\gamma \\ \dots & \\ \dot{U}_{B i_N} &= \dot{U}_{M_{N-1}} - Z_{i_N M_N} \cdot \Delta \dot{I}_{NN} - \Delta Z_{i_N S_N} \dot{I}_\gamma \end{aligned}. \quad (36)$$

Величины, входящие в выражения (35, 36), имеют те же определения, что и в (9). В результате, относительно искомым комплексных величин $\dot{U}_{i_1}^\beta, \dots, \dot{U}_{i_N}^\beta$ и $\dot{I}_{i_1}^\beta, \dots, \dot{I}_{i_N}^\beta$ соответственно получим следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{i_1}^\beta = \dot{U}_{B i_1} - Z_{i_1 j_1} \dot{I}_{i_1}^\beta \\ \dot{U}_{i_1}^\beta = -Z_{i_1} \dot{I}_{i_1}^\beta + (1+j0) \end{cases}, \quad (37)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{i_2}^\beta = \dot{U}_{B i_2} - Z_{i_2 j_2} \dot{I}_{i_2}^\beta \\ \dot{U}_{i_2}^\beta = -Z_{i_2} \dot{I}_{i_2}^\beta \\ \dots \end{cases}, \quad (38)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{i_N}^\beta = \dot{U}_{B i_N} - Z_{i_N j_N} \dot{I}_{i_N}^\beta \\ \dot{U}_{i_N}^\beta = -Z_{i_N} \dot{I}_{i_N}^\beta \end{cases}. \quad (39)$$

Приравнивая правые стороны выражения (37-39), получим:

$$Z_{i_1} \dot{I}_{i_1}^\beta - Z_{i_1 j_1} \dot{I}_{i_1}^\beta = -\dot{U}_{B i_1} + \dot{A}, \quad (40)$$

$$Z_{i_2} \dot{I}_{i_2}^\beta - Z_{i_2 j_2} \dot{I}_{i_2}^\beta = -\dot{U}_{B i_2}, \quad (41)$$

...

$$Z_{i_N} \dot{I}_{i_N}^\beta - Z_{i_N j_N} \dot{I}_{i_N}^\beta = -\dot{U}_{B i_N}. \quad (42)$$

Если разложить комплексные величины, входящие в выражения (40-42), на действительные и мнимые составляющие и вновь объединить относительно действительных величин, тогда получим:

$$\begin{bmatrix} A_{i_1}^\beta & \dots & B_{i_1}^\beta \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_1}^\beta & \dots & D_{i_1}^\beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{i_1}^\beta \\ \dots \\ I_{i_1}^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{B i_1} \\ \dots \\ -U_{B i_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+j0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (43)$$

$$\begin{bmatrix} A_{i_2}^\beta & \dots & B_{i_2}^\beta \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_2}^\beta & \dots & D_{i_2}^\beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{i_2}^\beta \\ \dots \\ I_{i_2}^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{B i_2} \\ \dots \\ -U_{B i_2} \end{bmatrix}, \quad (44)$$

...

$$\begin{bmatrix} A_{i_N}^\beta & \dots & B_{i_N}^\beta \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_N}^\beta & \dots & D_{i_N}^\beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{i_N}^\beta \\ \dots \\ I_{i_N}^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{B i_N} \\ \dots \\ -U_{B i_N} \end{bmatrix}. \quad (45)$$

В случае, когда $i_1 = 1, 2, 3$ и $l = 2$, то матричное уравнение (43) в развернутой форме имеет вид:

$$\begin{bmatrix} R_1 - R_{11} & X_1 + X_{11} & -R_{12} & X_{12} & -R_{13} & X_{13} \\ -R_{21} & X_{21} & R_2 - R_{22} & X_2 + X_{22} & -R_{23} & X_{23} \\ -R_{31} & X_{31} & -R_{32} & X_{32} & R_3 - R_{33} & X_3 + X_{33} \\ X_1 - X_{11} & -R_1 - R_{11} & -X_{12} & -R_{12} & -X_{13} & -R_{13} \\ -X_{21} & -R_{21} & X_2 - X_{22} & -R_2 - R_{22} & -X_{23} & -R_{23} \\ -X_{31} & -R_{31} & -X_{32} & -R_{32} & X_3 - X_{33} & -R_3 - R_{33} \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} I_1^\beta \\ I_2^\beta \\ I_3^\beta \\ I_1^\beta \\ I_2^\beta \\ I_3^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{B1} \\ -U_{B2} \\ -U_{B3} \\ -U_{B1} \\ -U_{B2} \\ -U_{B3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1+j0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (46)$$

При этом

$$\begin{aligned} A_i^\beta &= \begin{bmatrix} R_1 - R_{11} & X_1 + X_{11} & -R_{12} \\ -R_{21} & X_{21} & R_2 - R_{22} \\ -R_{31} & X_{31} & -R_{32} \end{bmatrix}; \\ B_i^\beta &= \begin{bmatrix} X_{12} & -R_{13} & X_{13} \\ X_2 + X_{21} & -R_{23} & X_{23} \\ X_{32} & R_3 - R_{33} & X_3 + X_{33} \end{bmatrix}; \\ C_i^\beta &= \begin{bmatrix} X_1 - X_{11} & -R_1 - R_{11} & -X_{12} \\ -X_{21} & -R_{21} & X_2 - X_{22} \\ -X_{31} & -R_{31} & -X_{32} \end{bmatrix}; \\ D_i^\beta &= \begin{bmatrix} -R_{12} & -X_{13} & -R_{13} \\ -R_2 - R_{22} & -X_{23} & -R_{23} \\ R_{32} & X_3 - X_{33} & -R_3 - R_{33} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

После установления матричных уравнений (43–45) можно определить значения искомого тока β сопряженной ЭЭС:

$$\begin{bmatrix} I_{i_1}^\beta \\ \dots \\ I_{i_1}^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{i_1}^\beta & \dots & B_{i_1}^\beta \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_1}^\beta & \dots & D_{i_1}^\beta \end{bmatrix}^{-1} \times \left(\begin{bmatrix} -U_{Bi_1}' \\ \dots \\ -U_{Bi_1}'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+j0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \right), \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} I_{i_2}^\beta \\ \dots \\ I_{i_2}^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{i_2}^\beta & \dots & B_{i_2}^\beta \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_2}^\beta & \dots & D_{i_2}^\beta \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} -U_{Bi_2}' \\ \dots \\ -U_{Bi_2}'' \end{bmatrix}, \quad (48)$$

$$\dots$$

$$\begin{bmatrix} I_{i_N}^\beta \\ \dots \\ I_{i_N}^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{i_N}^\beta & \dots & B_{i_N}^\beta \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{i_N}^\beta & \dots & D_{i_N}^\beta \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} -U_{Bi_N}' \\ \dots \\ -U_{Bi_N}'' \end{bmatrix}. \quad (49)$$

Обращая квадратные матрицы, входящие в (47–49), этим определяя составляющие $I_{i_1}^\beta, \dots, I_{i_N}^\beta$; $I_{i_1}^\beta, \dots, I_{i_N}^\beta$ находим искомые комплексные токи узлов β сопряженной ЭЭС. Затем, пользуясь выражениями (35), определением искомого комплексных напряжений $\dot{U}_{i_1}^\beta, \dots, \dot{U}_{i_N}^\beta$ завершается расчет установившегося режима β сопряженной ЭЭС.

Имея $\dot{I}_\lambda \hat{I}_\lambda$ комплексные токи исходной ЭЭС и определяя токи $\dot{I}_\lambda^\alpha(\hat{I}_\lambda^\alpha)$; $\dot{I}_\lambda^\beta(\hat{I}_\lambda^\beta)$ на основании полученных результатов по расчетам установившихся режимов α и β сопряженных ЭЭС, пользуясь выражением (2), определяем приращение $\Delta \dot{I}_l$ комплексного тока узла l , чем и завершается решение задачи.

Заключение.

1. Анализ расчета установившихся режимов основной, α и β сопряженных систем показывает, что индекс узла l , относительно которого необходимо определить приращение комплексного тока $\Delta \dot{I}_l$ фигурирует только в матричных уравнениях (5) и (47), что характеризуется наличием величины $1+j0$ на l -й строке.

2. Перемещая индекс l вверх и вниз, можем непосредственно без дополнительных расчетов определить приращения комплексных токов других узлов.

3. Сочетание теоремы Телледжена с идеей декомпозиции — диаоптики позволяет решить множество задач по большим ЭЭС.

Библиографический список

1. Хачатрян, В. С. К методам расчета собственных и взаимных сопротивлений сложных энергосистем / В. С. Хачатрян // Электричество. — 1964. — № 10. — С. 47–51.
2. Хачатрян, В. С. Диаоптика и задача определения обобщенных параметров больших энергосистем / В. С. Хачатрян, О. А. Суханов // Электричество. — 1973. — № 4. — С. 1–10.
3. Хачатрян, В. С. Метод декомпозиции и коррекции матрицы обобщенных параметров электрических систем /

В. С. Хачатрян, В. С. Сафарян // Электричество. — 1980. — № 12. — С. 18–23.

4. Хачатрян, В. С. Метод и алгоритм расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем / В. С. Хачатрян // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1973. — № 4. — С. 20–23.

5. Хачатрян, В. С. Определение установившихся режимов больших электроэнергетических систем с применением метода Ньютона-Рафсона / В. С. Хачатрян // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1974. — № 4. — С. 36–43.

6. Хачатрян, В. С. Автоматизация разбивки больших систем на радиально связанные оптимальные подсистемы / В. С. Хачатрян, М. А. Балабекян // Электричество. — 1977. — № 9. — С. 15.

7. Хачатрян, В. С. Метод коррекции установившихся режимов электрических систем / В. С. Хачатрян, Э. А. Этмекчян // Электричество. — 1987. — № 3. — С. 6–14.

8. Tellegen, B. D. A general network theorem with application / B. D. Tellegen. — Philips Res, 1952. — P. 259–269.

9. Хачатрян, В. С. Расчет установившегося режима большой электроэнергетической системы методом диаоптики / В. С. Хачатрян, Н. П. Бадалян // Электричество. — 2003. — № 6. — С. 13–17.

10. Хачатрян, В. С. Энергетическая теория электрических цепей и электроэнергетические системы / В. С. Хачатрян, Н. П. Бадалян, Э. А. Этмекчян, М. Г. Тамразян, А. Г. Гулян // Вестник ИАА. — 2010. — Т. 7, № 2. — С. 244–249.

11. Бадалян, Н. П. Решение задачи коррекции установившегося режима электроэнергетической системы методом декомпозиции / Н. П. Бадалян, Е. А. Чашин, Ю. В. Молокин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 1 (127). — С. 170–175.

БАДАЛЯН Норайр Петикович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры электротехники и электроэнергетики Владимирского государственного университета им. А. Н. и Н. Г. Столетовых.

Адрес для переписки: norayrbadalyan@mail.ru

МИТРОФАНОВ Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), декан факультета автоматики и электроники Ковровской государственной технологической академии им. В. А. Дегтярева.

ЧАЩИН Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой электротехники Ковровской государственной технологической академии им. В. А. Дегтярева.

Адрес для переписки: kanircha@list.ru

ШЕМАНАЕВА Людмила Ивановна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электротехники Ковровской государственной технологической академии им. В. А. Дегтярева.

Статья поступила в редакцию 20.04.2015 г.

© Н. П. Бадалян, А. А. Митрофанов, Е. А. Чашин, Л. И. Шеманаева

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЩЕТОК МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДОМ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В статье рассмотрен вопрос исследования интенсивности износа щеток электрических машин постоянного тока от изменения электрических и механических факторов. Интенсивность износа щеток оценивается с применением метода гранулометрического анализа. Приведены экспериментальные исследования и сформулированное уравнение регрессии для интенсивности износа щеток.

Ключевые слова: машины постоянного тока, электрические щетки, износ щеток, коллекторно-щеточный узел, метод гранулометрического анализа.

В процессе своей работы коллекторные машины постоянного тока (МПТ) подвержены комплексному воздействию электрических, механических и тепловых факторов.

Одним из главных факторов, оказывающих существенное влияние на коммутационные свойства МПТ и, следовательно, на её надёжность является контакт щетка-коллектор. Вследствие некорректной работы этого контакта возникает искрение, вызывающее износ как коллектора, так и щетки.

Текущая высота электрической щетки является определяющим показателем эффективности, надёжности и безопасности систем токосъема электрических машин различного назначения. Для определения высоты щетки как функции времени необходимо знать среднее значение скорости износа щетки в каждом из предполагаемых режимов работы системы.

Непосредственное определение скорости износа щетки является чрезвычайно трудоемкой и рутинной задачей, связанной с необходимостью строгого поддержания неизменными значения всех факторов воздействия, в том числе влажности и температуры окружающей среды в течение многих десятков и даже сотен часов, поскольку величина износа электрощеток, как правило, составляет несколько миллиметров за тысячи часов их эксплуатации. Определение лишь одного достоверного значения скорости износа требует 50–100 часов работы на специальных лабораторных стендах.

С целью установления зависимости интенсивности износа электрических щеток машин постоянного тока от изменения электрических и механических факторов были проведены экспериментальные исследования изнашивания щеточного контакта.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из двух машин постоянного тока ПЗ1М соединённых между собой механически. Испытуемая машина работает в качестве двигателя (М) и подключена к сети, вторая машина работает в режиме генера-

тора (G), отдавая вырабатываемую электрическую энергию на нагрузочный реостат (рис. 2).

Для сокращения времени исследования процессов износа было принято решение использовать метод гранулометрического анализа пылевидных продуктов износа, разработанный в Техническом университете г. Брно [1].

Суть метода гранулометрического анализа состоит в том, что для определения интенсивности износа щетки используется оптическая микроскопия, необходимая для расчета объема пылевидных продуктов износа за небольшой интервал работы МПТ. На основании полученных данных рассчитывают ресурс работы электрической щетки.

При определении состава порошковых продуктов износа для отбора части запыленного воздушного потока применялась металлическая трубка (байпас), содержащая внутри себя препятствия в виде предметного стекла с небольшим слоем масла, где и оседала пыль (рис. 3).

В испытуемой машине было выполнено технологическое отверстие, где устанавливался байпас, обеспечивающий прямой доступ к щеточному контакту и обеспечивающим непрерывный воздушный поток с пылью от изнашивания щеток.

Запыленные в течение 30 минут предметные стекла извлекались, накрывались аналогичными по размеру стеклами и после фотографировались под микроскопом при 100-кратном увеличении [2].

После фотографирования изображения щетки производилось объединение всех снимков стеклянной поверхности в один общий файл. Далее при помощи графических редакторов переводили изображения в растровое черно-белое, определяли границы частиц пыли, после подсчитывалось количество частиц с диаметром на изображении более 1 мм, с последующим определением объема частиц износа щеток МПТ [3] (рис. 4).

Для нахождения интенсивности износа электрических щеток на полученное изображение пыли



Рис. 1. Внешний вид установки для проведения испытаний

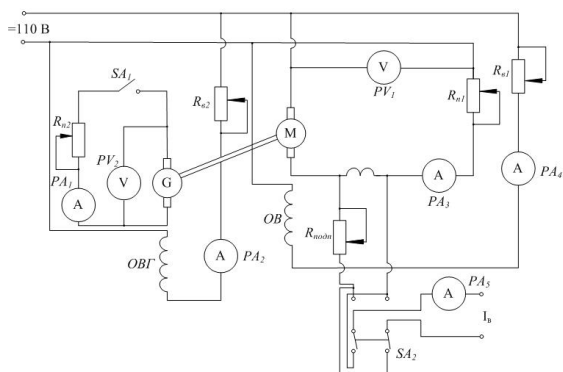


Рис. 2. Электрическая схема экспериментальной установки

от щеток накладывалась сетка из 100 квадратных ячеек, в которых определялось число частиц N_i с последующим определением их диаметра d_{fi} . После подсчета объема каждой из частицы износа щетки находился общий объем всей пыли осевшей на стекле $\sum V_i$.

$$\sum V_i = \sum N_i \cdot d_{fi} \quad (1)$$

Так как величина этих частиц мала, то объем каждой из них принимался равным радиусу.

После определения суммарного объема всех частиц пыли находили среднюю интенсивность износа за 1 минуту по формуле:

$$\Delta = \frac{\sum V_i}{t} \quad (2)$$

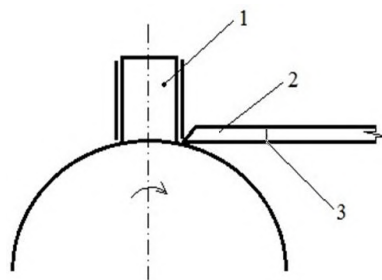


Рис. 3. Установка байпаса в зоне выделения продуктов износа щетки: 1 — щетка, 2 — байпас, 3 — стекло.

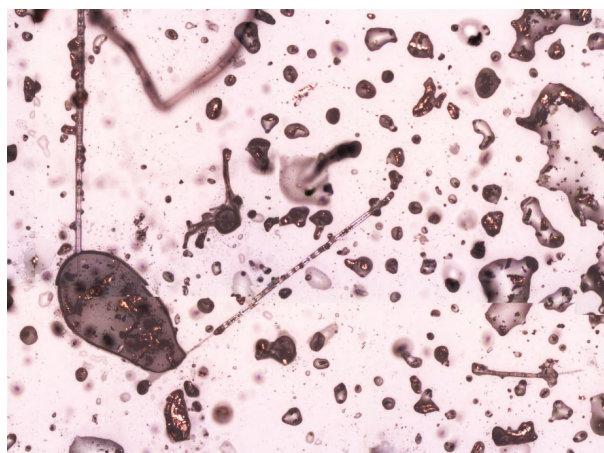
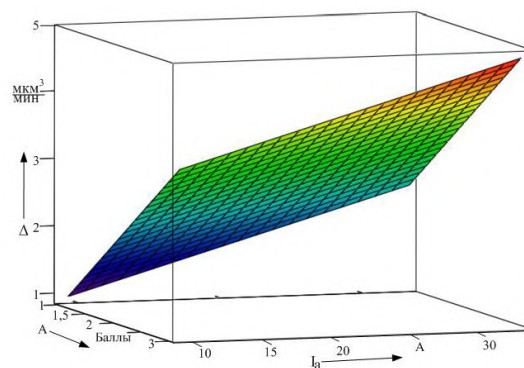


Рис. 4. Изображение пылевидных продуктов износа щетки ЭГ-74

Рис. 5. Зависимость интенсивности износа от тока якоря и уровня искрения при $n = 3000$ об/мин, $P_{щ} = 0,24$ кг/см²

где t — время проведения эксперимента. Для достижения поставленной цели проведен факторный эксперимент согласно теории планирования [3]; в качестве варьируемых факторов использовали: ток якоря, уровень искрения щеток, частота вращения и величина нажатия щеток.

Так как на этапе планирования эксперимента было достоверной информации об ориентации поверхности отклика, приняли как наиболее рациональный центральный композиционный план, отвечающий требованиям ротатбельности. Ротатбельность плана позволяет получить модель, способную предсказывать значение параметра оптимизации с одинаковой точностью независимо от направления на равных расстояниях от центра плана [4].

Факторный эксперимент проводился согласно методике ротатбельного равномер-планирования

Уровни и интервалы варьирования факторов

Параметр	Кодовое обозначение	Натуральные значения уровней факторов, соответствующие кодированным				
		+2	+1	0	-1	-2
Ток якоря I_a , А	x_1	33	27	21	15	9
Уровень искрения А, баллы ГОСТ 183-74	x_2	3	2	1 ½	1 ¼	1
Частота вращения n , об/мин	x_3	3300	3150	3000	2850	2700
Давление на щетку $P_{щ}$, кг/см ²	x_4	0,36	0,3	0,24	0,180	0,120

Таблица 2

Матрица ротатабельного униформпланирования второго порядка для числа факторов $k = 4$

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	Δ , МКМ ³ мин
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	4,356
2	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	3,63
3	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	3,872
4	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	2,662
5	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	1,452
6	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	0,968
7	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	2,2587
8	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	1,7747
9	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	2,2587
10	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	1,1293
11	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	1,1293
12	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	0,5647
13	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	4,1947
14	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	2,3393
15	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	1,936
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,6453
17	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	2,5813
18	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	1,3713
19	+	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	2,7427
20	+	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	1,2907
21	+	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	2,904
22	+	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	1,7747
23	+	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	2,2587
24	+	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	3,5493
25	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,0973
26	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5813
27	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,42
28	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,904
29	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5813
30	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,42
31	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2907

эксперимента типа 2^k при количестве факторов $k = 4$. Проведение эксперимента включало в себя проведение 31 опыта, включая «звездные» точки и «нулевые». Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл. 1. Матрица планирования эксперимента и функция отклика приведены в табл. 2.

Факторы варьировались независимо друг от друга. Уровень искрения регулировался изменением величины тока подпитки и отпитки добавочных полюсов МПТ. Частота вращения регулировалась изменением тока возбуждения. Давление на щетку увеличивалось и уменьшалось путем замены пружины. Ток якоря варьировался изменением нагрузки генератора G.

По результатам эксперимента получили уравнение регрессии для интенсивности износа щеток МПТ в кодированном виде:

$$\Delta = 2,305 + 0,37 \cdot x_1 + 0,303 \cdot x_2 + 0,296 \cdot x_3 + 0,242 \cdot x_4 - 0,292 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,706 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (3)$$

Адекватность модели была проверена с помощью критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$, расчетное значение составило $F_p = 3,97$ что меньше табличного значения $F_T = 4,57$. Следовательно, математическую модель, представленную формулой 1, можно считать адекватной.

Переходя от кодированных x_1, x_2, x_3, x_4 значений факторов к натуральным $I_a, A, n, P_{щ}$ получена зависимость интенсивности износа электрических щеток при изменении основных электрических и механических факторов в КЩУ МПТ:

$$\Delta = 41,77 + 0,616 \cdot I_a + 5,88 \cdot A - 0,0168 \cdot n - 2021 \cdot P_{щ} - 19,47 \cdot A \cdot P_{щ} + 0,079 \cdot n \cdot P_{щ}. \quad (4)$$

Графики зависимостей интенсивности износа от факторов представлены на рис. 5, 6.

При изменении только лишь электрических факторов воздействия на щеточный узел (рис. 5) наибольшая величина интенсивности износа щеток была достигнута при самом высоком значении тока якоря и самом высоком уровне искрения. Эти две величины ведут к увеличению электроэрозионной составляющей износа щетки. При изменении механических факторов (рис. 6) — нажатие на щетку и высокая частота вращения МПТ влияют на интенсивность износа нелинейно, наибольшая величина интенсивности износа наблюдается при высокой частоте вращения и сильном нажатии на щетку.

В то же время необходимо отметить, что две составляющие износа (электроэрозионная и механическая) неотделимы друг от друга и неразрывно связаны между собой.

Полученная регрессионная модель позволяет оценить интенсивность износа щеток МПТ применительно к исследуемому двигателю и может быть

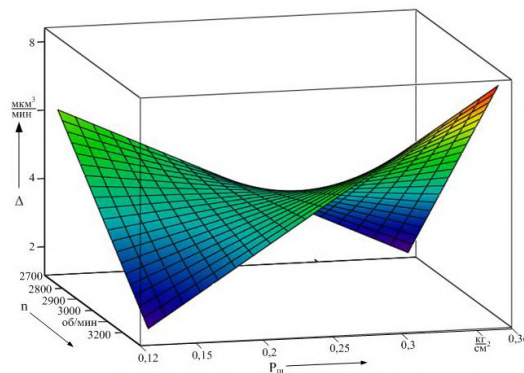


Рис. 6. Зависимость интенсивности износа от частоты вращения и величины давления на щетку при $I_a = 21$ А и уровне искрения 1,5 балла

использована для определения ресурса работы щеток и диагностирования состояния КЩУ МПТ.

Библиографический список

1. Veselka, F. Měřicí zařízení pro aplikaci metody prachových částic. Technický týdeník, 2011, roč. 59, č. 7, s. 30–30. – ISSN 0040-1064.
2. Веселка, Ф. Гранулометрический анализ пылевидных продуктов износа электрических щеток / Ф. Веселка, В. Н. Забоин / Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. // Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 67–76.
3. Байсадыков, М. Ф. Методика применения микроскопа для анализа порошковых частиц и обработка результатов измерений / М. Ф. Байсадыков // Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. // Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 23–29.
4. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника».

БАЙСАДЫКОВ Марсель Фаритович, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

ХЛОПЦОВ Андрей Сергеевич, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника». Адрес для переписки: marsel_b@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.06. 2015 г.

© В. В. Харламов, М. Ф. Байсадыков, А. С. Хлопцов

ВЛИЯНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОСТИ «СОМБРЕРО» НА СТЕПЕНЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ ИНЕРЦИОННО-ВАКУУМНОГО ЗОЛОУЛОВИТЕЛЯ

Главной целью данной работы является выявление влияния сдвига «сомбреро» от оси на показатель эффективности установки. Эта работа важна для реализации промышленной модели инерционно-вакуумного золоуловителя. Лучшая эффективность достигается при корректных размерах, пропорциях и отношениях одних элементов к другим, что очень сложно спроектировать в жизни. Ниже просчитаны различные варианты для проверки выявления отклонения эффективности улавливания от первичных результатов при вибрациях «сомбреро» из-за больших расходов потока уходящих газов. Разработка аппарата ИВЗ выполняется по заданию фонда «Энергия без границ».

Ключевые слова: золоулавливание, инерционно-вакуумный золоуловитель, ИВЗ, конструкция.

ИВЗ [1] (инерционно-вакуумный золоуловитель) — аппарат для газоочистных работ, работа которого основывается на разделении потока газов от мельчайших взвешенных в нем частиц (рис. 1). От стандартного циклона ИВЗ отличается наличием «сомбреро» (рассекателя) и колец, расположенных на удерживающих их крестовине) и прочих дополнительных элементах (конфузорных и диффузорных участков), улучшающих работу установки.

При идеально центральном расположении «сомбреро» ИВЗ может показать результаты в 99,94 %. Для достижения этого желательны равные сечения на выходе из входной трубы. Из-за сложности реализации подобной установки в жизни необходимо проверить влияние сдвига b (рис. 2) на качество улавливания аппарата в целом.

Математическая модель состоит из уравнений гидрогазодинамики [2].

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0,$$

уравнения движения:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial x}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial z}), \\ \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial x}) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial z}), \\ \rho u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial x}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial z}), \end{aligned}$$

уравнения k - ε модели:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial}{\partial x} (k) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} (k) + \rho \omega \frac{\partial}{\partial z} (k) &= \frac{\partial}{\partial x} (\mu_t \frac{\partial k}{\partial x}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} (\mu_t \frac{\partial k}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_t \frac{\partial k}{\partial z}) + \mu_t D - \rho \varepsilon, \\ \rho u_x \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon) + \rho \omega \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} (\frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} D - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned}$$

уравнение для эффективной и суммарной вязкости:

$$\mu_{\Sigma} = \mu + \mu_t, \quad \mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Так как в расчете участвует гетерогенный поток, необходимо также указать уравнение, которым описывается движение частиц. Влияние частиц на поток будет минимальным из условия, что поток слабозапыленный (70 г/м³ на 150000 м³/ч расхода

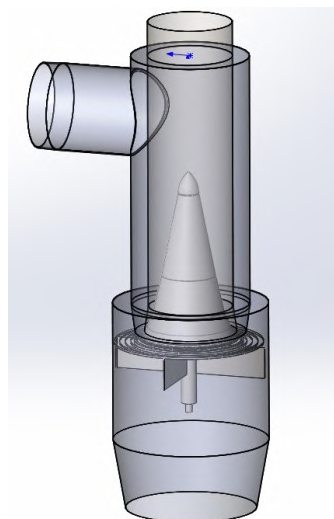


Рис. 1. Промышленный вид ИВЗ, который разрабатывается сейчас из средств ВТИ

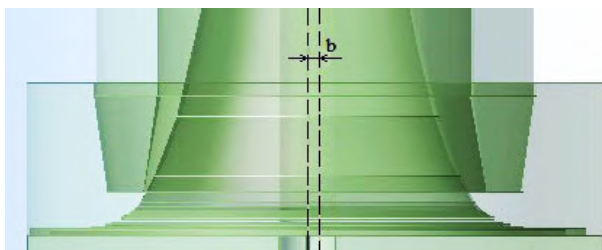


Рис. 2. Сдвиг «сомbrero» от центральной оси на расстояние b

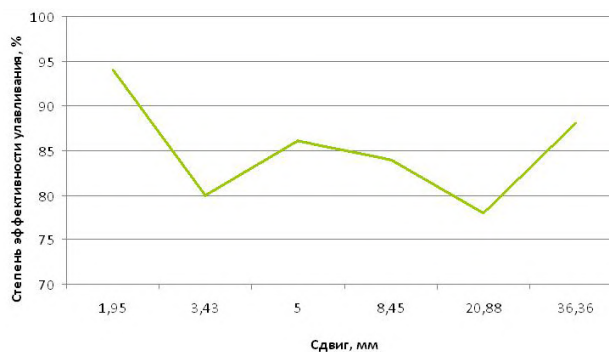


Рис. 3. График зависимости показателя сдвига на степень эффективности улавливания

уходящих газов). Силы, действующие на частицу, которые влияют на её ускорение за счет разницы скоростей между частицей и жидкостью, а также перемещение жидкости с помощью частицы. Уравнение движения такой частицы было получено Бассетом, Буассинесом и Озееном:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_{BA}.$$

Физический смысл сил, находящихся по правую сторону уравнения.

F_D — сила сопротивления, действующая на частицу.

F_B — выталкивающая сила земного притяжения.

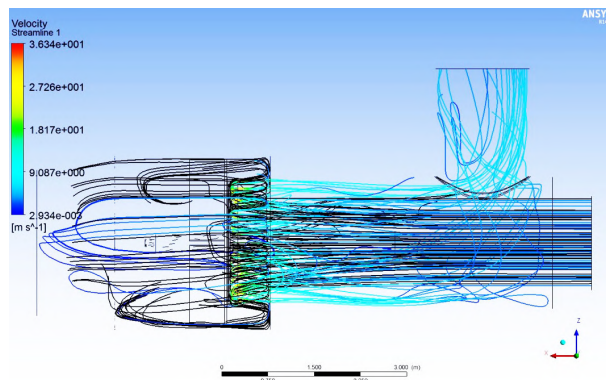


Рис. 4. Эффективность улавливания при сдвиге «сомbrero» в 1,95 мм

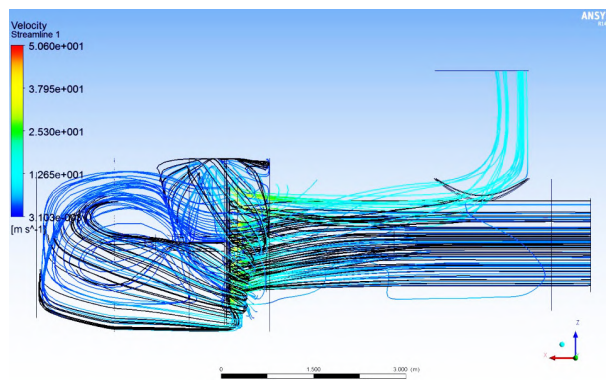


Рис. 5. Эффективность улавливания при сдвиге 36,36 мм

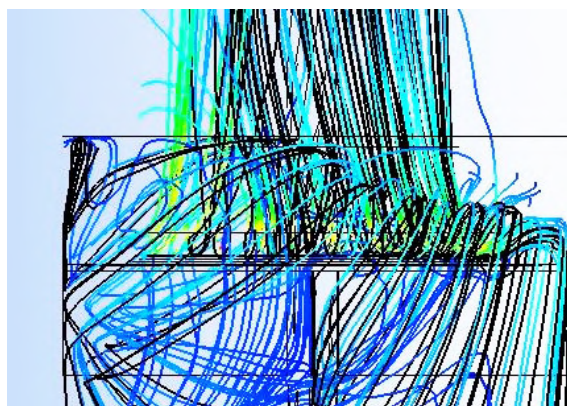


Рис. 6. Неравномерность улавливания пыли при сдвиге в 36,36 мм

F_R — силы, возникающие за счет вращения потока (центробежная и сила Кориолиса).

F_{VM} — виртуальная (или добавочная) массовая сила. Это усилие для того, чтобы ускорить виртуальную массу жидкости в объеме, занимаемом частицами. Этот термин имеет важное значение, когда смещенная масса жидкости превышает массу частиц, например, в движении пузырьков. В данном случае равна нулю.

F_{BA} — сила Бассета или расчет той части, на долю которой приходится отклонение в структуре потока от стационарного состояния. Этот термин не применяется в CFX. Равна нулю в данном расчете.

Граничными условиями были выбраны давление на входе в 1 атм, давление на выходе 99340 Па, ве-

Таблица 1

Влияние осесимметричности «сомбреро» на степень эффективности улавливания ИВЗ

Сдвиг от центральной оси в сторону, мм	Степень эффективности улавливания, %
0	99,94
1,95	94
3,43	80
5	86
8,45	84
20,88	78
36,36	88

дены в учет силы гравитации, влияние слабозапыленного потока на уходящие газы. Частицы, которые движутся в потоке, от 5–30 мкм, расход газа — 150000 м³/ч, модель турбулентности — k-ε, кинетическая энергия — 1 м²/с², диссипация — 0,0001 м²/с³ [3]. Процесс изотермичен при температуре в 179 °С.

В ходе испытаний были выявлены результаты, которые сведены в табл. 1, а зависимость их отобразена на рис. 3.

Исходя из результатов, можно сделать вывод, что зависимость влияния неоднозначна, нет стабильного улучшения показателей или ухудшения по мере увеличения сдвига. Любое изменение сечения на выходе из входной трубы приводит к тому, что распределение скоростей по ходу потока становится по обе стороны «сомбреро» неодинаковым.

На рис. 4 видно, что почти все частицы остались в бункере, и лишь небольшая часть ушла не уловленной. Это происходило при сдвиге в почти 2 мм. Однако даже такой сдвиг приводит к ухудшениям показателей улавливания. Для лучшей работы необходимо производить жесткую фиксацию такого элемента, как «сомбреро», чтобы устранить подобные вариации сдвига.

На рис. 5 и 6 показано движение потока при максимальном сдвиге в 36,36 мм. На рис. 6 отмасштабирован участок разворота потока и сепарации частиц. Из цветовой градации можно отметить, что распределение скоростей происходит нерав-

номерно, где сечение уже, там скорости больше и очистка газа проходит лучше. А в другом сечении тем временем скорости значительно снижаются и кинетической энергии частиц не хватает на отрыв от газов из-за давления и малой скорости, и под давлением дымососа они движутся на выход.

Библиографический список

1. Пат. 93298 Российская Федерация, МПК⁷ В 01 D 45/06. Инерционно-вакуумный пылеуловитель / Белоглазов В. П. ; заявитель и патентообладатель ООО «Вихрь». — № 2009144229/22 ; заявл. 30.11.09 ; опубл. 27.04.10, Бюл. № 12. — 6 с.

2. Влияние скорости дисперсного потока в конфузном сечении инерционно-вакуумного пылеуловителя на степень улавливания частиц // Проблемы, перспективы и стратегические инициативы развития теплоэнергетического комплекса : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 10 июня / В. П. Белоглазов, М. В. Комаров, А. С. Мозжегоров, А. А. Петрищев, И. В. Рафальский ; под ред. : В. В. Шалаева, А. С. Ненишева, А. Г. Михайлова, Т. В. Новиковой. — Омск : ОмГТУ, 2011. — 92–95 с.

3. Белоглазов, В. П. Влияние входной скорости в инерционно-вакуумном золоуловителе на степень улавливания золы экибастузского угля / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 3 (133). — С. 183–197.

БЕЛОГЛАЗОВ Владимир Петрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: vpbn@mail.ru

БЕЛОГЛАЗОВА Любовь Владимировна, магистр, младший научный сотрудник кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: teploblv@mail.ru

ЧАВРИКОВ Игорь Евгеньевич, магистрант гр. ТЭМ-151 факультета элитного образования и магистратуры.

РОЩИН Николай Николаевич, магистрант группы ТЭМ-151 факультета элитного образования и магистратуры.

Статья поступила в редакцию 16.09.2015 г.

© В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова, И. Е. Чавриков, Н. Н. Рощин

Книжная полка

621.317/М55

Мешкова, О. Б. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учеб. пособие / О. Б. Мешкова. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

Целью учебного пособия является изучение разнообразных методов и средств измерения и контроля, принципов их действия, настройки, поверки и обслуживания, анализ основных достоинств и недостатков наиболее распространенных методов и средств измерений. В учебном пособии приведены основные понятия метрологии, основы теории погрешностей измерений, рассмотрены методы и средства неразрушающего контроля качества, особенности измерений различных электрических и неэлектрических величин, а также основные метрологические характеристики параметрических и генераторных измерительных преобразователей.

Предназначено для студентов специальности 200503 «Стандартизация и сертификация» очной, очно-заочной и заочной форм обучения.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СГЛАЖИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В статье представлены результаты оценки эффективности работы сглаживающих устройств тяговых подстанций участка Подволошная—Шаяля по данным измерительных систем, установленных на преобразовательных агрегатах и фидерах контактной сети. Построена экспериментальная частотная характеристика сглаживающего устройства. Представлены рекомендации по совершенствованию схем сглаживающих устройств.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, сглаживающее устройство, учет электроэнергии, постоянный ток.

В настоящее время эксплуатационная длина участков железных дорог России, электрифицированных на постоянном токе, составляет около 19 тыс. км. При этом электроснабжение обеспечивается более чем 900 тяговыми подстанциями постоянного тока. Для снижения опасных и мешающих влияний системы тягового электроснабжения на смежные устройства тяговые подстанции постоянного тока оснащаются сглаживающими устройствами (СУ).

Для нормального функционирования устройств связи и обеспечения мешающего (психометрического) напряжения в линии связи не более 1 мВ [1] многочисленные исследования и опыт эксплуатации позволяют предъявить к СУ при любых схемах выпрямления следующее требование: среднее значение психометрического напряжения U_{2nc} на выходе СУ тяговой подстанции постоянного тока при воздушных линиях связи не должно превышать 4 В (при интегральной вероятности 0,95–5 В) [2], а при кабельных линиях связи — 20 В (при интегральной вероятности 0,95–30 В).

Мешающее влияние системы тягового электроснабжения постоянного тока на волоконно-оптические линии связи не учитывается.

Для нормального функционирования устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) нормируются следующие предельные значения напряжения отдельных гармоник на выходе СУ:

— при кодовой автоблокировке частотой 50 Гц напряжение гармоники 100 Гц на выходе СУ не должно превышать 100 В;

— при автоблокировке с тональными рельсовыми цепями, работающими в диапазоне частот 400–

800 Гц, напряжение гармоники 600 Гц на выходе СУ не должно превышать 2,3 В.

Опасное влияние системы тягового электроснабжения постоянного тока на фазочувствительные рельсовые цепи частотой 25 и 50 Гц можно не учитывать вследствие их высокой помехозащитности [3].

До последнего времени оценить эффективность работы СУ на тяговой подстанции можно было лишь теоретически, т.к. отсутствовала возможность получения измерительной информации на стороне постоянного тока [4]. В рамках реализации Инвестиционной программы «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» в 2014 г. Омским государственным университетом путей сообщения на тяговых подстанциях в границах опытного полигона Подволошная—Шаяля Свердловской железной дороги была внедрена автоматизированная система мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети (АСМУЭ ФКС).

Комплект системы АСМУЭ ФКС для одной тяговой подстанции постоянного тока включает измерительные блоки на фидерах контактной сети, концентратор (с поддержкой до 24 каналов) и оптический коммутатор, осуществляющий учет расхода и возврата электрической энергии по всем ФКС тяговой подстанции. Интервал записи показаний измеряемых величин при этом составляет — 3 с, 6 с, 60 с и 30 минут [5]. Автоматическая передача информации с тяговых подстанций на единый сервер системы осуществляется по каналу сотовой связи стандарта GSM либо по сети передачи данных ОАО «РЖД» (СПД). В состав сервера также входит



а)



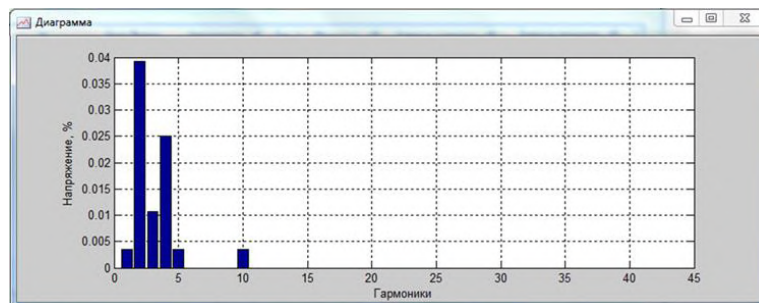
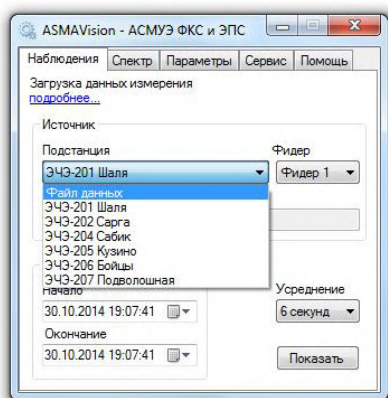
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Внешний вид элементов систем АСМУЭ ФКС:

а — концентратор и оптический коммутатор подстанции; б — блок питания; в — измерительный преобразователь; г — сервер; д — рабочие «окна» программного обеспечения

автоматизированное рабочее место пользователя, обеспечивающее доступ к нормативно-справочной информации и предоставление пользователям и эксплуатационному персоналу регламентированного доступа к визуальным, печатным и электронным данным: выбор тяговой подстанции и интересующего присоединения, выбор интервала усреднения, выбор интервала измерения, табличное и графическое отображения результатов измерений (рис. 1).

К основным информативным параметрам относятся:

— напряжение, ток (со знаком), значение активной мощности (со знаком) по фидерам контактной сети и вводам 3,3 кВ с заданным интервалом времени;

— приращение активной энергии по фидерам контактной сети и вводам 3,3 кВ на заданном интервале;

— время выполнения измерений с привязкой к системе обеспечения единого времени.

Одной из функций системы является возможность измерения действующих значений гармоник выпрямленного напряжения, что позволило

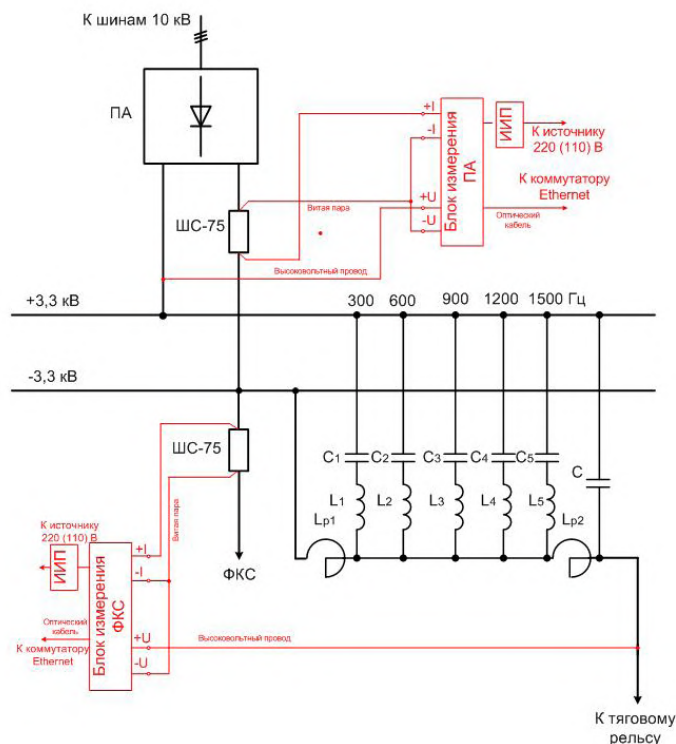


Рис. 2. Принципиальная схема подключения измерительной системы на тяговой подстанции постоянного тока для оценки эффективности работы СУ

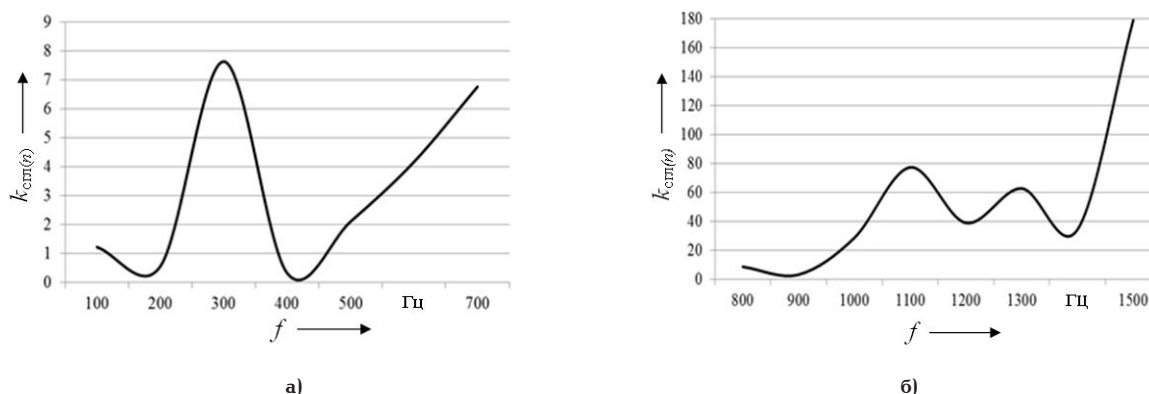


Рис. 3. Экспериментальная частотная характеристика СУ тяговой подстанции Шаля: а — для диапазона частот 100–700 Гц; б — для диапазона частот 800–1500 Гц

выполнить оценку эффективности работы СУ, установленных на тяговых подстанциях. При этом учитывалось, что на рассматриваемом участке применяется кодовая автоблокировка частотой 50 Гц, волоконно-оптические линии связи, а на тяговых подстанциях установлены двенадцатипульсовые выпрямители.

На всех тяговых подстанциях участка установлены двухзвенные СУ, первое звено которых включает в себя пять резонансных контуров, рассчитанных на частоты от 300 до 1500 Гц, а второе звено — аperiodическую часть.

Для оценки эффективности работы СУ производились синхронные измерения напряжения гармоник выпрямленного напряжения по данным приборов учета, установленных на выходе преобразовательного агрегата (ПА), что соответствует входу

СУ, и на фидерах контактной сети (ФКС), что соответствует выходу СУ (рис. 2).

Мешающее (псифометрическое) напряжение на входе или выходе СУ определяется по выражению:

$$U_{nc} = \sqrt{\sum_{n=2}^{36} (U_n p_n)^2}, \quad (1)$$

где U_n — действующее значение напряжения гармоника n -го порядка;

p_n — коэффициент акустического воздействия гармоника n -го порядка, значения которого представлены в [6].

Коэффициент сглаживания гармоника n -го порядка определяется по формуле:

$$k_{сгл(n)} = \frac{U_{1(n)}}{U_{2(n)}}, \quad (2)$$

Результаты оценки эффективности работы СУ на участке Подволошная–Шаля

Тяговая подстанция	Псофометрическое напряжение, В		Результирующий коэффициент сглаживания	Напряжение гармоника 100 Гц, В	
	на входе СУ	на выходе СУ		на входе СУ	на выходе СУ
Шаля	24,7	6,0	4,1	16,2	13,3
Сарга	45,1	19,9	2,2	21,0	21,0
Сабик	19,3	5,4	3,6	21,6	21,5
Кузино	4,7	4,5	1,1	17,2	16,0
Бойцы	5,0	1,7	2,9	15,2	14,7
Подволошная	3,9	1,3	2,9	15,2	15,2

где $U_{1(n)}$, $U_{2(n)}$ — действующее значение напряжения гармоника n -го порядка на входе и выходе СУ соответственно.

Результирующий коэффициент сглаживания СУ рассчитывается по формуле:

$$k_{сгл,рез} = \frac{U_{1nc}}{U_{2nc}} \quad (3)$$

где U_{1nc} , U_{2nc} — мешающее (псофометрическое) напряжение на входе и выходе СУ.

На рис. 3 представлена экспериментальная частотная характеристика СУ тяговой подстанции Шаля, построенная по результатам обработки измерительной информации.

Из рис. 3 видно, что имеют место две зоны усиления сигнала в диапазонах 110–210 Гц, 360–460 Гц. В остальных диапазонах наблюдается подавление сигнала. Необходимо отметить, что целесообразно на настройка резонансных контуров частотой 900, 1200 и 1500 Гц, т.к. на этих частотах наблюдается уменьшение уровня подавления сигнала в сравнении с соседними частотами.

Аналогичные исследования выполнены для других тяговых подстанций (табл. 1). Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Все СУ находятся в рабочем состоянии, за исключением тяговой подстанции Кузино, и обеспечивают достаточный коэффициент сглаживания. Тем не менее, при сохранении существующих схем СУ целесообразно провести настройку резонансных контуров на отдельных тяговых подстанциях.

2. Псофометрическое напряжение на тяговых подстанциях Шаля, Сарга и Сабик оказывается существенно выше (более чем в три раза), чем на тяговых подстанциях Кузино, Бойцы и Подволошная. Это может быть обусловлено значительно более низкой мощностью короткого замыкания системы внешнего электроснабжения тяговых подстанций Шаля, Сарга и Сабик (примерно в два раза). Тем не менее даже в случае применения кабельных линий связи в качестве резервных все СУ обеспечивают достаточное сглаживание выпрямленного напряжения, а с учетом применения помехоустойчивых

волоконно-оптических линий связи и двенадцатипульсовых схем выпрямления применение сложных двухзвенных схем СУ не является целесообразным.

3. СУ не обеспечивают существенного подавления гармоника 100 Гц, так как это не предусмотрено их конструкцией. Однако измерения показывают, что значение этой гармоника не превышает 21,5 В, что вполне достаточно для нормального функционирования кодовой автоблокировки.

4. Результаты измерений показывают, что в условиях применения двенадцатипульсовых выпрямителей и волоконно-оптических линий связи дальнейшая эксплуатация двухзвенных СУ является неэффективной. Следует рассмотреть вопрос реконструкции этих схем в более простые однозвенные апериодические или резонансно-апериодические после проведения дополнительных исследований отключающей способности быстродействующих выключателей постоянного тока.

Таким образом, использование измерительной информации, полученной по данным АСМУЭ ФКС, установленной на ПА и ФКС, позволяет оценить эффективность работы СУ тяговых подстанций и подготовить рекомендации по изменению схемы СУ или настройке резонансных контуров.

Библиографический список

1. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрических железных дорог постоянного тока [Текст]. — М. : Транспорт, 1969. — 44 с.
2. Шалимов, М. Г. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / М. Г. Шалимов. — М. : Транспорт, 1990. — 127 с.
3. Схемные решения сглаживающих фильтров тяговых подстанций постоянного тока для участков с фазочувствительными рельсовыми цепями 25 Гц, 50 Гц и рельсовыми цепями тональной частоты [Текст] : отчет о НИР (заключит.) // Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2004. — 49 с.
4. Повышение эффективности систем тягового электроснабжения переменного и постоянного тока и сокращение потерь электрической энергии в них [Текст] : моногр. / В. Т. Черемисин, В. А. Кващук, Ю. В. Кондратьев [и др.] // Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2014. — 144 с.

5. Черемисин, В. Т. Концепция Единой автоматизированной системы учета электрической энергии на тягу поездов [Текст] / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, С. Ю. Ушаков // Транспорт Урала. — 2013. — № 4 (39). — С. 83–87.

6. Скоков, Р. Б. Снижение влияния тяговой сети постоянного тока на автоблокировку с тональными рельсовыми цепями [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Р. Б. Скоков. — Омск, 2004. — 124 с.

КАШТАНОВ Алексей Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части.
Адрес для переписки: kesh-al@rambler.ru

КОМЯКОВ Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: tskom@mail.ru

КОМЯКОВА Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, проректор по учебно-методической работе.

Адрес для переписки: komyakovatv@omgups.ru

Статья поступила в редакцию 01.07.2015 г.

© А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, Т. В. Комякова

УДК 621.331.5

Ю. В. КОНДРАТЬЕВ
А. В. ТАРАСЕНКО
А. А. КОМЯКОВ
В. Л. НЕЗЕВАК

Омский государственный
университет путей сообщения

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрена методика определения параметров устройств продольной компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения переменного тока электрических железных дорог.

Ключевые слова: тяговое электроснабжение, переменный ток, реактивная мощность, устройство продольной компенсации, параметры.

Высокое потребление реактивной мощности на электрифицированных железных дорогах переменного тока, обусловленное спецификой электроподвижного состава, приводит к повышенному уровню потерь напряжения и мощности и, как следствие, снижает энергетическую эффективность и потенциальную пропускную и провозную способность железных дорог. Для уменьшения потерь энергии и снижения коэффициента реактивной мощности применяют устройства компенсации реактивной мощности, которые могут включаться параллельно нагрузке (поперечная компенсация [1]) или последовательно с ней (продольная компенсация), способствуя повышению напряжения в контактной сети, уровень которого определяется на основе проведения тяговых и электрических расчетов [2].

Устройства продольной компенсации реактивной мощности размещают в отсасывающей линии тяговой подстанции для системы тягового электроснабжения 25 кВ и в линиях «понижающий трансформатор — рельс» со стороны контактной сети и питающего провода для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ (рис. 1).

Определение мощности устройств продольной компенсации реактивной мощности выполняют в следующем порядке:

1) оценивают целесообразность установки переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности;

2) определяют расчетные значения сопротивления и тока устройства продольной компенсации реактивной мощности и, при необходимости, ступеней его регулирования;

3) выбирают параметры устройства продольной компенсации реактивной мощности.

Целесообразность установки переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности [3] оценивают путем анализа режимов параллельной работы понижающих трансформаторов тяговой подстанции в зависимости от значения тяговой нагрузки:

— если на расчетном участке железной дороги на тяговую нагрузку постоянно работает только один понижающий трансформатор, то целесообразна установка непереключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности;

— если на тяговую нагрузку постоянно работают два понижающих трансформатора или же второй понижающий трансформатор включают при кратковременном увеличении тяговой нагрузки, или в периоды с интенсивным движением, то целесообразна установка переключаемого устройства

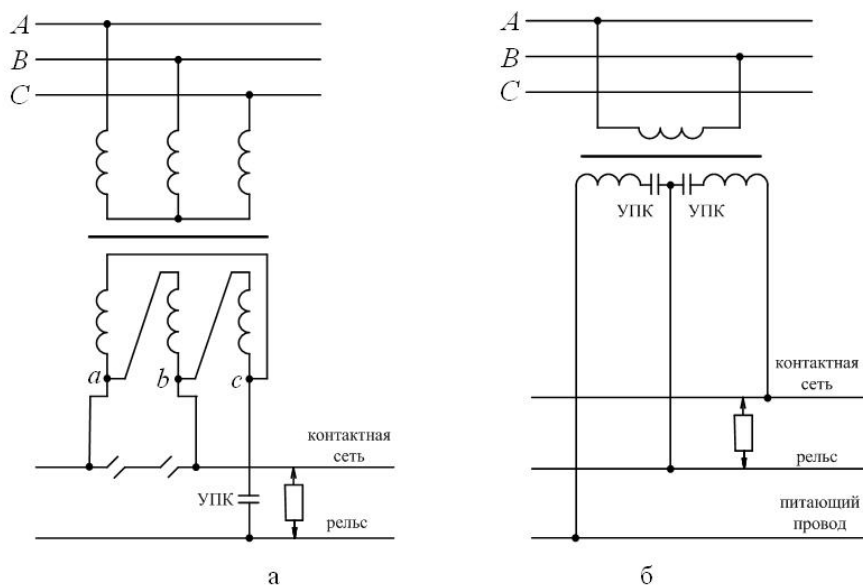


Рис. 1. Включение устройств продольной компенсации реактивной мощности на тяговых подстанциях в системе тягового электроснабжения 25 кВ (а) и 2×25 кВ (б)

продольной компенсации реактивной мощности с двухступенчатым регулированием; при этом постоянно в работу введена первая ступень, а вторую подключают при включении в работу второго понижающего трансформатора.

Расчетное значение номинального сопротивления непереключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности определяют по выражению:

$$X'_{\text{УПК (неперек)}} = X_{\text{тр}} + X_c, \quad (1)$$

где $X_{\text{тр}}$ — индуктивное сопротивление понижающего трансформатора; X_c — индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения, Ом.

В случае, если на рассматриваемой тяговой подстанции установлены понижающие трансформаторы различной мощности, то расчет $X_{\text{тр}}$ выполняют для трансформатора с наибольшей мощностью.

Для системы тягового электроснабжения 25 кВ значения сопротивлений трансформатора и системы внешнего электроснабжения приводят к номинальному напряжению 27,5 кВ, а для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ — к номинальному напряжению 55 кВ.

Расчетное значение номинального тока непереключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности определяют исходя из допустимого тока отсасывающей линии понижающего трансформатора с учетом 1,5-кратной перегрузки:

— для системы тягового электроснабжения 25 кВ с трехфазными трансформаторами:

$$I'_{\text{УПК (неперек)}} = \frac{1,5k_3 S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}k_{\text{пер}}}, \quad (2)$$

— для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ с однофазными трансформаторами:

$$I'_{\text{УПК (неперек)}} = \frac{1,5k_3 S_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}k_{\text{пер}}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность понижающего трансформатора; $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение,

принимаемое равным 27,5 кВ для системы тягового электроснабжения 25 кВ, 55 кВ — для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ; k_3 — коэффициент запаса (принимают равным 1,3); $k_{\text{пер}}$ — коэффициент перегрузки конденсаторов за 10 мин (определяют исходя из технических характеристик конденсаторов, применяемых в устройстве продольной компенсации реактивной мощности).

Результирующее расчетное сопротивление переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности, складывающееся из сопротивлений первой и второй ступени, определяют по выражению:

$$X'_{\text{УПК (перек)}} = \frac{X_{\text{тр}1} \cdot X_{\text{тр}2}}{X_{\text{тр}1} + X_{\text{тр}2}} + X_c, \quad (4)$$

где $X_{\text{тр}1}$, $X_{\text{тр}2}$ — сопротивление первого и второго понижающего трансформатора тяговой подстанции.

Расчетное сопротивление первой ступени переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности совпадает с расчетным сопротивлением для непереключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности:

$$X'_{\text{УПК (перек)1}} = X'_{\text{УПК (неперек)}}. \quad (5)$$

Расчетное сопротивление второй ступени переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности:

$$X'_{\text{УПК (перек)2}} = \frac{X'_{\text{УПК (перек)1}} \cdot X'_{\text{УПК (перек)1}}}{X'_{\text{УПК (перек)1}} - X'_{\text{УПК (перек)1}}}. \quad (6)$$

Результирующий расчетный ток для переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности определяют исходя из максимального 10-минутного тока тяговой нагрузки $I_{\text{макс}(10)}$:

$$I'_{\text{УПК (перек)}} = \frac{k_3 I_{\text{макс}(10)}}{k_{\text{пер}}}. \quad (7)$$

Для системы тягового электроснабжения 25 кВ значение $I_{\text{макс}(10)}$ определяют для отсасывающей линии тяговой подстанции, а для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ — для контактного прохода.

Расчетный ток для первой ступени устройства продольной компенсации реактивной мощности совпадает с расчетным током для непереключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности:

$$I'_{\text{УПК(перекл)}} = I'_{\text{УПК(неперекл)}} \quad (8)$$

Расчетный ток для второй ступени устройства продольной компенсации реактивной мощности определяют по выражению:

$$I'_{\text{УПК(перекл)2}} = I'_{\text{УПК(перекл)}} - I'_{\text{УПК(перекл)1}} \quad (9)$$

Если $I'_{\text{УПК(перекл)1}}$ по результатам расчетов меньше $I'_{\text{УПК(перекл)2}}$, то для данных условий нет необходимости в установке переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности.

На основе расчетных значений $X'_{\text{УПК}}$ и $I'_{\text{УПК}}$ выбирают номинальные параметры $X_{\text{УПК}}$ и $I_{\text{УПК}}$ устройства продольной компенсации реактивной мощности серийного производства и, при необходимости, ступеней его регулирования с учетом следующих выражений:

$$\begin{cases} I_{\text{УПК}} \geq I'_{\text{УПК}}, \\ 0,7X'_{\text{УПК}} \leq X_{\text{УПК}} \leq 1,1X'_{\text{УПК}}. \end{cases} \quad (10)$$

Номинальное значение установленной мощности конденсаторных батарей устройства продольной компенсации реактивной мощности и ступеней его регулирования определяют исходя из выражения:

$$Q_{\text{УПК}} = \frac{U_{\text{УПК}}^2}{X_{\text{УПК}}}, \quad (11)$$

где $U_{\text{УПК}}$ — номинальное рабочее напряжение устройства продольной компенсации реактивной мощности в максимальном режиме, принимаемое по паспортным данным.

Для тяговых подстанций системы тягового электроснабжения 2×25 кВ предусматривают разделение устройства продольной компенсации реактивной мощности на две последовательно соединенные равные части, одну из которых подключают в линию «понижающий трансформатор-рельс» со стороны контактной сети, а другую — в линию «понижающий трансформатор — рельс» со стороны питающего провода.

Предлагаемая методика расчета может использоваться при стандартизации методов расчета, поскольку позволяет установить единый порядок

определения мощности и выбора мест размещения устройств продольной компенсации реактивной мощности на основе обобщения накопленного опыта внедрения и эксплуатации, исключить ошибки и возможные неточности при проектировании, а также установить задачи, имеющие приоритетное значение при выборе того или иного варианта внедрения устройств [4].

Использование предлагаемой методики позволит определять оптимальные параметры устройств продольной компенсации реактивной мощности в тяговой сети и повысить технико-экономические показатели работы участков железных дорог переменного тока.

Библиографический список

1. Кондратьев, Ю. В. Выбор мощности и места размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности / Ю. В. Кондратьев, А. В. Тарасенко // Известия Транссиба. — 2015. — № 2 (22). — С. 79–87.
2. Вильгельм, А. С. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока / А. С. Вильгельм, А. А. Комяков, В. Л. Незевак // Известия Транссиба. — 2014. — № 3 (19). — С. 54–65.
3. Герман, Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: моногр. [Текст] / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. — М.: МИИТ, 2011. — 164 с.
4. Комяков, А. А. Стандартизация методов расчета параметров устройств компенсации реактивной мощности в хозяйстве электрификации и электроснабжения / А. А. Комяков, О. А. Комякова, А. Л. Каштанов [и др.]; Омский гос. ун-т путей сообщения // Метрологическое и нормативное обеспечение качества и безопасности продукции: материалы Всерос. науч.-техн. конф. — Омск, 2014. — С. 24–28.

КОНДРАТЬЕВ Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

ТАРАСЕНКО Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

КОМЯКОВ Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

НЕЗЕВАК Владислав Леонидович, кандидат технических наук, доцент (Россия), старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость».

Адрес для переписки: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, кафедра ЭЖТ, Тарасенко А. В.

Статья поступила в редакцию 09.09.2015 г.

© Ю. В. Кондратьев, А. В. Тарасенко, А. А. Комяков, В. Л. Незевак

Омский государственный
технический университет
Нижевартовский
государственный университет
Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ КУСТОВОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Разработан метод идентификации коэффициента полезного действия кустовой насосной станции на основе генетических алгоритмов и данных, полученных с датчиков температуры, давления, расхода. Проведена апробация предложенного метода на основе экспериментальных данных, полученных с действующих агрегатов. Отличительной особенностью предложенного метода, является идентификация коэффициента полезного действия насоса при ограниченной информации о физических величинах перекачиваемой жидкости.

Ключевые слова: кустовая насосная станция, генетические алгоритмы, идентификация.

Ухудшение технического состояния центробежных насосных агрегатов (ЦНА) кустовой насосной станции (КНС), которая обеспечивает процесс закачки воды в нефтяной пласт, приводит к появлению дополнительных потерь электроэнергии. Дополнительные потери вызваны снижением производительности насосных агрегатов вследствие увеличения внутренних протечек насоса и работой неисправных насосов на общий выходной трубопровод вне допустимой рабочей зоны, что в итоге приводит к снижению КПД насосов.

Полный контроль за техническим состоянием ЦНА возможен при комплексном диагностическом обследовании, которое включает в себя применение тепловизионной диагностики (пирометрическая диагностика) и вибродиагностику ЦНА [1–3]. Вибрационное состояние является одним из основных показателей, характеризующих состояние силовых элементов насосного агрегата. Этот вид диагностики отличается от других методов технической диагностики рядом характерных особенностей и прежде всего многообразием физической природы вибрационных сигналов и высокой информативностью. Способность предупреждать появление неисправностей выгодно отличает вибродиагностику от других методов диагностирования, позволяющих в основном контролировать состояние агрегата и обнаруживать неисправности.

Тепловизионная диагностика (обследование) — это осмотр ЦНА в инфракрасном диапазоне спек-

тра, измерение температуры в любой его точке, наблюдение динамики тепловых процессов, а также создание банка данных теплового состояния по каждому из наблюдаемых объектов. Пирометрическая диагностика обеспечивает наиболее удобные и точные способы анализа состояния, действующего ЦНА путем измерения теплового излучения нагретых частей оборудования.

При работе ЦНА возникают гидравлические, объемные и механические потери, поэтому КПД включает в себя все вышеперечисленные составляющие и определяется по выражению

$$\eta = \eta_c \cdot \eta_o \cdot \eta_m, \quad (1)$$

где $\eta_c \cdot \eta_o \cdot \eta_m$ — гидравлический (обусловлен мощностью, затраченной на преодоление гидравлического сопротивления), объемный (определяет потери из-за перетоков мощности внутри насоса и утечек через сальниковые уплотнения) и механический КПД (обусловлен трением в подшипниках, концевых уплотнениях и вращающихся деталей насосов) соответственно.

В практике удобно проводить оценку КПД насосного агрегата, основанную на термодинамическом методе. Вывод уравнений термодинамического метода для практического определения КПД основывается на уравнении сохранения энергии и законах термодинамики и приведен в работах [2, 3]. Одним из недостатков данного метода является

$\Delta \hat{P}$ перемножаются на коэффициенты k_1 и k_2 в масштабирующем блоке (БМ):

$$\Delta \hat{P}_0 = \Delta \hat{P} \cdot k_2, \quad \hat{Q}_0 = \hat{Q} \cdot k_1, \quad (5)$$

где $k_1 = \frac{1}{Q_{\max}}$, $k_2 = \frac{1}{\Delta P_{\max}}$, Q_{\max} — максимальный расход газа, ΔP_{\max} — максимальная разность давлений.

Затем вычисляются невязки:

$$\Delta_1 = |\Delta P_0 - \Delta \hat{P}_0|, \quad \Delta_2 = |Q_0 - \hat{Q}_0|, \quad (6)$$

где $\Delta P_0 = \Delta P \cdot \frac{1}{P_{\max}}$ — приведенная разность давлений, $Q_0 = Q \cdot \frac{1}{Q_{\max}}$ — приведенный расход жидкости.

Далее на сумматоре вычисляется результирующая ошибка Δ :

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2, \quad (7)$$

на основании которой в блоке генетических алгоритмов (ГА) формируется первоначальный вектор оценки параметров $\hat{r} = [\hat{\rho} \ \hat{c} \ \hat{\alpha} \ \hat{\eta}_i]$. Далее цикл многократно повторяется до тех пор, пока ошибка не будет стремиться к нулю $\Delta \rightarrow 0$. Для устранения получения ложных решений в ходе идентификации с помощью ГА были выбраны границы поискового диапазона, которые представлены в табл. 2 [4, 5].

Основной идеей разработанного подхода идентификации параметров ЦНА является обеспечение сходимости ошибки, путем циклической оптимизации с помощью генетических алгоритмов [4].

Полученные в ходе идентификации параметры для насосного агрегата 1 и 2, представлены в табл. 3, 4. Для проверки адекватности разработанного метода было проведено по пять итераций для каждого агрегата.

Максимальная ошибка коэффициента полезного действия для 1 и 2 агрегата не превышает 9 % (рис. 2, 3). Среднее значение ошибки коэффициента полезного действия для агрегата 1 составляет 5 %, а для второго агрегата 2,47 %.

Для оценки физических величин перекачиваемой жидкости, полученных в результате идентификации, было введено следующее выражение:

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{\max}} + \frac{c}{c_{\max}} + \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \quad (8)$$

Среднее значение для первого агрегата составляет 0,86 а, для второго агрегата 0,91, что говорит об адекватных данных, полученных в ходе идентификации физических величин перекачиваемой жидкости. Небольшая ошибка объясняется тем, что физические параметры перекачиваемой жидкости и коэффициент полезного действия, получаемые в ходе идентификации, имеют взаимное влияние.

Особенностью предложенного подхода к оценке является возможность идентификации коэффициента полезного действия и физических величин перекачиваемой жидкости в определенном локальном диапазоне. Полученные в ходе идентификации параметры могут быть использованы для настройки и обеспечения оптимального режима работы насосной станции и для построения диагностических систем.

Таблица 2

Границы поискового диапазона

	ρ , кг/м ³	\tilde{n} , Дж/кг °С	α , 1/°С	η_i , %
Min	918	3762	0,000315	30
Max	1122	4598	0,000385	80

Таблица 3

Данные агрегата 1

№	ρ , кг/м ³	ρ / ρ_{\max}	\tilde{n} , Дж/кг °С	\tilde{n} / c_{\max}	α , 1/°С	α / α_{\max}	η_i	η_i / η_{\max}	δ , о.е.
1	922	0,82	3827,7	0,83	0,000382	0,99	0,674	0,84	0,88
2	1059,7	0,94	3764,1	0,82	0,000302	0,78	0,646	0,81	0,84
3	1014,7	0,9	3956,1	0,86	0,000312	0,81	0,644	0,81	0,85
4	1016,9	0,9	4223,2	0,92	0,000341	0,88	0,629	0,79	0,90
5	1034,2	0,92	4165,1	0,91	0,000267	0,69	0,627	0,78	0,84

Таблица 4

Данные агрегата 2

№	ρ , кг/м ³	ρ / ρ_{\max}	\tilde{n} , Дж/кг °С	\tilde{n} / c_{\max}	α , 1/°С	α / α_{\max}	η_i	η_i / η_{\max}	δ , о.е.
1	1034,9	0,92	4455,2	0,97	0,0003812	0,99	0,49	0,61	0,96
2	1114,0	0,99	4255,0	0,93	0,0003047	0,79	0,49	0,62	0,90
3	1108,2	0,99	4117,0	0,89	0,0003686	0,95	0,499	0,624	0,94
4	1089,9	0,97	3982,6	0,86	0,0030787	0,79	0,511	0,639	0,87
5	1119,6	0,998	4364,9	0,94	0,0003148	0,83	0,481	0,601	0,92

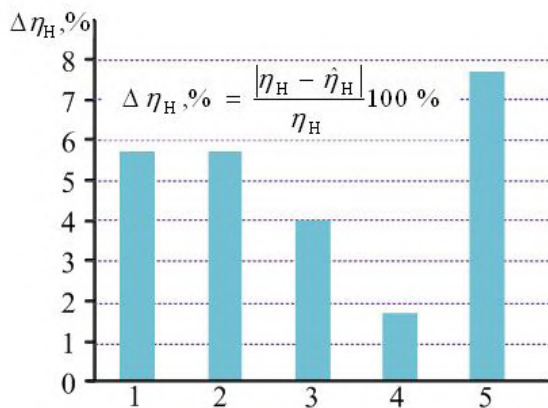


Рис. 2. Относительная ошибка коэффициента полезного действия для первого агрегата

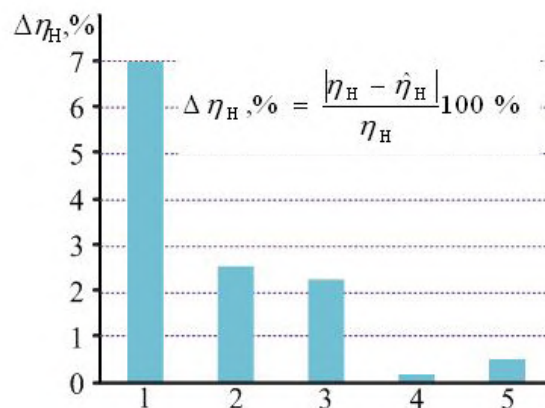


Рис. 3. Относительная ошибка коэффициента полезного действия для второго агрегата

Таким образом, в результате исследований было установлено, что возможно произвести идентификацию параметров прокачиваемой жидкости и коэффициента полезного действия ЦНА с помощью генетических алгоритмов в определенном локальном диапазоне; на коэффициент полезного действия небольшое влияние имеют значения параметров физических величин перекачиваемой жидкости; скорость сходимости генетических алгоритмов влияет на точность идентификации коэффициента полезного действия и зависит от вычислительных и временных ресурсов.

Библиографический список

1. Татаринцев, А. В. Методика диагностирования электронасосных агрегатов дожимных насосных станций по параметрам вибрации / А. В. Татаринцев, В. П. Фролов, В. В. Воробьев. — Тюмень : АО Техника и технология добычи нефти, 1994. — 80 с.
2. Фролов, В. П. Использование диагностики нефтепромыслового оборудования для энергосбережения / В. П. Фролов, В. В. Воробьев. — Тюмень : ОАО СибНИИЭНГ, 1998. — 268 с.
3. Пухальский, А. А. Основные направления диагностики нефтепромыслового электрооборудования / А. А. Пухальский, В. В. Сушков, В. П. Фролов // Тр. Тюмен. нефтяного науч.-технолог. центра. Сер. Энергосбережение и диагностика. — 1999. — № 3. — 121 с.

4. Генетические алгоритмы, нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский [и др.]. — Харьков : ОСНОВА, 1997. — 112 с.

5. Панченко, Т. В. Генетические алгоритмы : учеб. пособие / Т. В. Панченко ; под ред. Ю. Ю. Трасевича. — Астрахань : Астраханский ун-т, 2007. — 87 с.

ЛЫСЕНКО Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрической техники Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: deolas@mail.ru

СУШКОВ Валерий Валентинович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры энергетики Нижневартковского государственного университета.

Адрес для переписки: sushkovvv@gray-nv.ru

ТИМОШКИН Вадим Владимирович, ассистент кафедры электропривода и электрооборудования энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Адрес для переписки: timvv@sibmail.com

Статья поступила в редакцию 17.09.2015 г.

О. А. Лысенко, В. В. Сушков, В. В. Тимошкин

Книжная полка

621.311/Г90

Грунин, В. К. Основы электроснабжения объектов. Расчет электрических нагрузок : учеб. электрон. изд. локального распространения : конспект лекций / В. К. Грунин. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены характеристика и структура систем электроснабжения, классификация и характеристика как приемников, так и потребителей электрической энергии. Представлены графики электрических нагрузок и коэффициенты, характеризующие графики. Приведены методы расчета нагрузок на различных уровнях СЭС и даны рекомендации по их выбору.

Предназначен для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» очной, очно-заочной и заочной форм обучения.

А. И. АНТОНОВ
М. Г. ВИШНЯГОВ
Ю. М. ДЕНЧИК
Д. А. ЗУБАНОВ
В. И. КЛЕУТИН
А. А. РУППЕЛЬ
А. А. СИДОРЕНКО

Омский институт водного
 транспорта (филиал)
 Сибирского государственного
 университета водного транспорта,
 г. Омск
 Сибирский государственный
 университет водного транспорта,
 г. Новосибирск

АНАЛИЗ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНДУКТИВНОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ПОМЕХИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Описано проведенное испытание на ЗАО «Завод соединительных деталей». Описан способ обработки результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии средствами программного продукта в среде разработки LabVIEW. Произведен анализ соответствия суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения на каждой фазе участка предприятия требованиям ГОСТ 32144-2013.

Ключевые слова: качество электроэнергии, коэффициент несинусоидальности напряжения, электромагнитная помеха, осциллограмма напряжений, статистическая обработка данных.

Несинусоидальность напряжения характеризуется искажением синусоидальной формы кривой напряжения. Её появление связано с наличием в сети нелинейных элементов. Промышленными источниками гармонических искажений в СЭС общего назначения являются нагрузки, обладающие нелинейными характеристиками: вентиляльные преобразователи; дуговые сталеплавильные печи; трансформаторы с нелинейными вольт-амперными характеристиками; индукционные печи; тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта на постоянном токе.

Гармоники имеют синусоидальную форму кривой, изменяющуюся периодически с частотой в n раз превышающей основную частоту первой гармоники. Так как основная частота ($f = 50$ Гц) может изменяться в определённых пределах, то и частота n -й гармоники также изменяется. Поэтому гармоники характеризуются не частотой, а порядком, указывающим их кратность по отношению к основной частоте.

При оценке качества электроэнергии допускается учитывать ряд гармоник от 2-й до 40-й включительно.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144–2013 характеризует несинусоидальность напряжения как вид искажения гармоническими и интергармоническими составляющими напряжения [1].

Показателями КЭ, относящимися к гармоническим составляющим напряжения являются:

— значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$ в процентах напряжения основной гармонической составляющей U_1 в точке передачи электрической энергии;

— значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей) K_U , % в точке передачи электрической энергии.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения по своей природе аналогичен значению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения. Поэтому, для того чтобы определить кондуктивную низкочастотную помеху по коэффициенту несинусоидальности

кривой напряжения, необходимо рассмотреть суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

Для оценки соответствия показателей качества электроэнергии (ПКЭ) требованиям ГОСТ 32144-2013 необходимо провести испытания для определения значений ПКЭ и полученные результаты испытаний обработать. Измерения напряжения гармонических составляющих U_n должны быть проведены в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51317.4.7, класс I и в соответствии с ГОСТ 30804.4.30. Вычисляют значения этих коэффициентов по усредненным на определенном интервале значениям. При этом указывается определенное число наблюдений N . Таким образом, коэффициент $K_{U(n)}$ определяется по формуле, % [2]

$$K_{U(n)} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N K_{U(n)i}^2}{N} \right]^{0.5}, \quad (1)$$

где $K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U} \cdot 100$; U_i — действующее значение напряжения основной частоты при i -м наблюдении, В; $U_{(n)i}$ — действующее значение напряжения n -й гармоники, В.

Коэффициент K_U определяется по формуле, %:

$$K_U = \left[\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N} \right], \quad (2)$$

где $K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_i} \cdot 100$; 40 — количество учитываемых гармоник.

Испытания проводились на предприятии ЗАО «Завод соединительных деталей» на литейном участке. Литейный участок состоит из 4-х литейных установок, работающих от напряжения 42 В и печи закалки мощностью 150 кВт.

Для измерений использовался информационно-вычислительный комплекс ИВК «Омск-М» заводской номер 42. Использовались шесть измерительных каналов: три для измерения напряжения на шинах подстанции и три для измерения токов, подключены к вторичной обмотке измерительных трансформаторов ТА.

Проверка качества электроэнергии на соответствие требованиям ГОСТ 32144-2013 проводилась по суммарному коэффициенту гармонических составляющих K_U . Для обработки результатов измерений по данному ПКЭ использовали программный продукт «Обработка экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по суммарному коэффициенту установившегося напряжения», разработанный в среде программного продукта Lab VIEW.

Предлагаемая программа позволяет создавать пользователю удобный интерфейс, получить все необходимые значения для оценки результатов измерений показателей качества электрической энергии. Кроме того, большинство современных приборов для измерения показателей качества электроэнергии, включая ИВК «Омск-М» позволяет экспортировать результаты измерений в формате MS EXCEL.

Достоверное значение кондуктивной ЭМП может быть определено только статистическими методами. Процесс возникновения кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения представляется математической моделью:

$$K_U \left[\begin{array}{l} P(K_{U,H} < K_U < K_{U,n}) > 0,05; \\ P(K_{U,n} < K_U < \infty) \neq 0 \end{array} \right] \subseteq \delta K_U, \quad (3)$$

где δK_U — кондуктивная низкочастотная ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения, %.

Таким образом, кондуктивная ЭМП δK_U появляется в сети тогда, когда вероятность нахождения величины K_U в течение измеряемого времени в пределах $(K_{U,H}; K_{U,n})$ превышает 0,05, а в пределах $(K_{U,n}; \infty)$ не равна нулю. При этом вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения определяется по формуле:

$$P(\delta K_U) = P(K_{U,H} < K_U < K_{U,n}) + P(K_{U,n} \leq K_U < \infty) - 0,05. \quad (4)$$

Программа позволяет вычислять такие параметры распределения значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, как математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение. Математическое ожидание $M(K_U)$ характеризует средний уровень коэффициента гармонических составляющих в рассматриваемом пункте сети за контролируемый период времени.

Математическое ожидание определяется по формуле [3]:

$$M(K_U) = \sum_{i=1}^k \overline{\delta U}_i P_i, \quad (5)$$

где k — число разрядов гистограммы; $\overline{\delta U}_i$ — значение середины i -го интервала; P_i — вероятность попадания коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в i -й интервал.

Для проведения статистической обработки экспериментальных данных, полученных при помощи ИВК «Омск-М», в программе предлагается сначала экспортировать данные измерений в документ Microsoft Excel.

После этого следует сохранить полученные данные как текстовые файлы (с разделителями табуляции) [4].

Для анализа результатов полученных расчетов необходимо установить номинальное значение напряжения 0,38 кВ, выбрать фазу, для которой будет рассчитываться ПКЭ. Число квантилей гистограммы установили равным 10.

Параметры распределения значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на фазе А следующие (рис. 1):

— математическое ожидание суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $M(K_U) = 1,43434$ %;

— максимальное значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U,max} = 1,92$ %;

— минимальное значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U,min} = 0,99$ %;

— среднеквадратическое отклонение $\sigma [K_U] = 0,167872$ В.

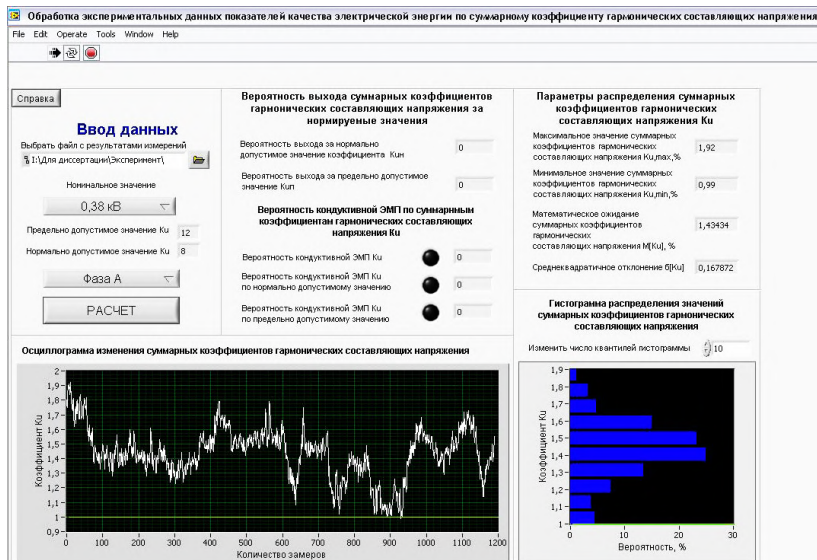


Рис. 1. Интерфейс программы по обработке экспериментальных данных показателей качества электрической энергии для фазы А на литейном участке

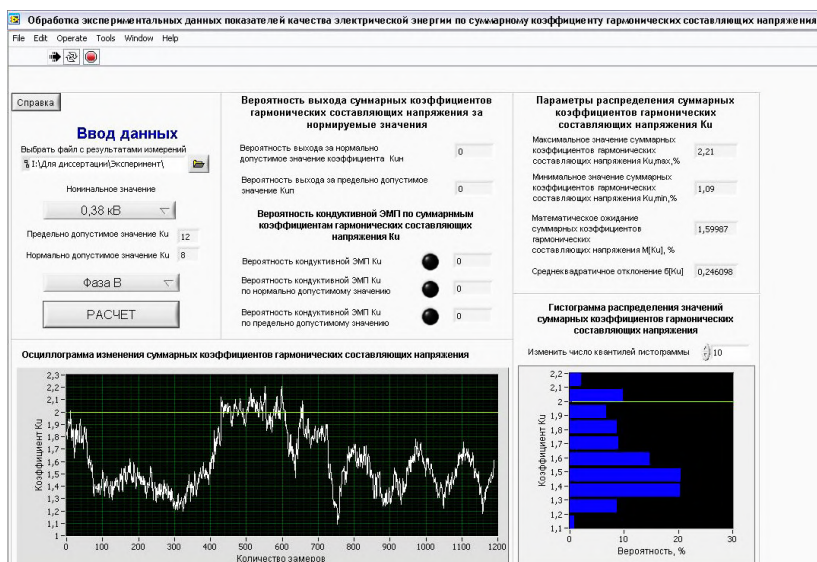


Рис. 2. Интерфейс программы по обработке экспериментальных данных показателей качества электрической энергии для фазы В на литейном участке

Параметры распределения значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на фазе В следующие (рис. 2):

- математическое ожидание суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $M(K_U) = 1,59987 \%$;
- максимальное значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U,max} = 2,21 \%$;
- минимальное значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U,min} = 1,09 \%$;
- среднеквадратическое отклонение $\sigma [K_U] = 0,246098 \%$.

Параметры распределения значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на фазе С следующие (рис. 3)

- математическое ожидание суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $M(K_U) = 1,49591 \%$;

- максимальное значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U,max} = 2,01 \%$;
- минимальное значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U,min} = 1,04 \%$;
- среднеквадратическое отклонение $\sigma [K_U] = 0,209332 \%$.

При этом на всех фазах вероятность кондуктивной ЭМП K_U по нормально и предельно допустимым значениям равно 0.

Также вероятность выхода за нормально допустимое и предельно допустимое значение на всех фазах равно 0.

Следовательно, на данном участке наблюдается соответствие качества электрической энергии по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения ГОСТу 32144-2013.

Таким образом, можно сделать следующие **выводы**:

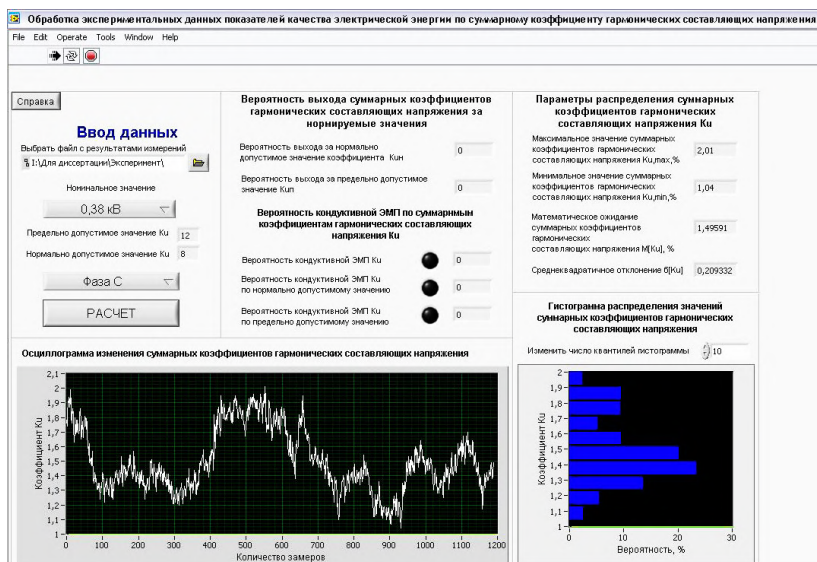


Рис. 3. Интерфейс программы по обработке экспериментальных данных показателей качества электрической энергии для фазы С на литейном участке

1) программный продукт позволил создать удобный интерфейс по обработке результатов экспериментальных исследований кондуктивной низкочастотной помехи по коэффициенту несинусоидальности кривой напряжения для каждой фазы на литейном участке;

2) при обработке данных с помощью программного продукта выявлено соответствие суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ГОСТу 32144-2013 на литейном участке на ЗАО «Завод соединительных деталей».

Библиографический список

1. ГОСТ 32144–2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109–97 ; введ. 2014–07–01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 20 с.

2. Антонов, А. И. Порядок обработки результатов экспериментальных исследований на соответствие отклонения напряжения требованиям ГОСТ 32144-2013 / А. И. Антонов, Ю. М. Денчик, Д. А. Зубанов, А. А. Руппель // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2015. – № 2 (140). – С. 163–166.

3. Антонов, А. И. Анализ проведения испытаний на соответствие установленного отклонения напряжения требованиям ГОСТ 54149-2010 [Текст] / А. И. Антонов, Ю. М. Денчик, Д. А. Зубанов, В. И. Клеутин, А. А. Руппель, А. С. Никишкин // Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 4. – С. 210–213.

4. Зубанов, Д. А. Обработка результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии средствами программы labVieW [Текст] / Д. А. Зубанов,

В. И. Клеутин, А. А. Сидоренко [и др.] // Сборник научных трудов ОИВТ. – 2012. – № 10. – С. 118–122.

АНТОНОВ Александр Игоревич, ассистент кафедры электротехники и электрооборудования Омского института водного транспорта (ОИВТ) (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ), г. Омск.

ВИШНЯГОВ Михаил Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования Омского института водного транспорта (ОИВТ) (филиал) СГУВТ, г. Омск.

ДЕНЧИК Юлия Михайловна, кандидат технических наук, докторант кафедры электроэнергетических систем и электротехники СГУВТ, г. Новосибирск.

ЗУБАНОВ Дмитрий Александрович, ассистент кафедры электротехники и электрооборудования ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

КЛЕУТИН Владислав Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

РУППЕЛЬ Александр Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

СИДОРЕНКО Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

Адрес для переписки: elektrotex@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.09.2015 г.

© А. И. Антонов, М. Г. Вишнягов, Ю. М. Денчик, Д. А. Зубанов, В. И. Клеутин, А. А. Руппель, А. А. Сидоренко

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В МАТЛАВ ДЛИТЕЛЬНЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассмотрена реализация в среде Simulink (Matlab) длительного несимметричного режима работы участка распределительной сети напряжением 0,4 кВ. Модель и алгоритмы расчета энергетических параметров системы электроснабжения воспроизведены посредством применения входящих в Matlab пакет Simulink и библиотеки блоков SimPowerSystem.

Ключевые слова: качество электрической энергии, имитационная модель, несимметричная нагрузка, потери мощности.

В последнее десятилетие, в связи с бурным развитием и внедрением информационных технологий, все более широкое применение находят методы расчета и моделирования режимов работы систем электроснабжения на ЭВМ. При этом важнейшим фактором, обеспечивающим эффективное решение и достоверность результатов при достижении поставленных инженерных задач, помимо производительности ЭВМ, является и применяемое при исследованиях программное обеспечение. По нашему мнению, наиболее оптимальным решением в данном случае является использование интегрированных пакетов программирования, ориентированных на решение задач имитационного моделирования в конкретных отраслевых областях. В частности для имитационного моделирования электротехнических устройств и систем наиболее оптимально подходит прикладная программа Simulink и библиотека блоков SimPowerSystem из ядра пакета Matlab.

Выбор данного программного продукта обусловлен наличием современных методов визуально-ориентированного программирования, развитого математического аппарата, библиотеки моделей пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередач и т.п.

Система пакета Matlab позволяет пользователю осуществлять вывод информации в любой удобной для него форме: графики, диаграммы, таблицы и т.п. Кроме того, интерфейс Matlab допускает возможность получать и передавать информацию при связи с редактором электронных таблиц Microsoft Excel.

Используя возможности Simulink и SimPowerSystem можно не только моделировать, но и анализировать работу различных устройств. Библиотека блоков SimPowerSystem охватывает достаточно широкий спектр энергетического, измерительного и вспомогательного оборудования [1]. В то же время, если в стандартной библиотеке нет блока, моделирующего необходимое оборудование или алгоритм,

то пользователь имеет возможность создать свой собственный блок. Реализовать возможности Simulink по созданию подсистем можно как с помощью уже имеющихся в базе блоков, так и на основе моделей основной библиотеки Simulink и управляемых источников тока или напряжения.

В настоящей статье представлена имитационная модель участка системы электроснабжения, созданной с учетом вышеуказанных свойств пакета Simulink.

Базовая схема, представленная на рис. 1, позволяет в диалоговом режиме оценивать несимметрию трехфазной сети, исследовать дополнительные потери в системах электроснабжения в зависимости от различных уровней несимметрии напряжений и токов.

Основными элементами данной модели являются программируемый источник напряжения (Controlled Voltage Source ABC), четырехпроводная кабельная линия на основе блоков Series RLC branch, изменяющаяся во времени нагрузка (Controlled Current Source ABC), подсистемные блоки Simulink, обрабатывающие и выводящие необходимую для дальнейших расчетов информацию с датчиков измерения электрических величин (Three-Phase V-I Measurement, Scope, Sequence Analyzer). В дополнение к стандартным блокам Simulink были созданы и включены в модель элементы-блоки (Subsystem 1, Subsystem 2), которые позволяют определять показатели качества электрической энергии, потери напряжения и мощности, дополнительные потери мощности в элементах и прочие основные электрические характеристики в характерных точках исследуемой системы.

Блоки Subsystem 1 и Subsystem 2 позволяют определять для каждой из фаз величину напряжения (U) и тока (I), активную (P), реактивную (Q) мощность, коэффициент мощности ($\cos \phi$), симметричные составляющие напряжения (U_1, U_2, U_0) и коэффициенты несимметрии напряжений по обратной (K_{2U}) и нулевой последовательностям (K_{0U}).

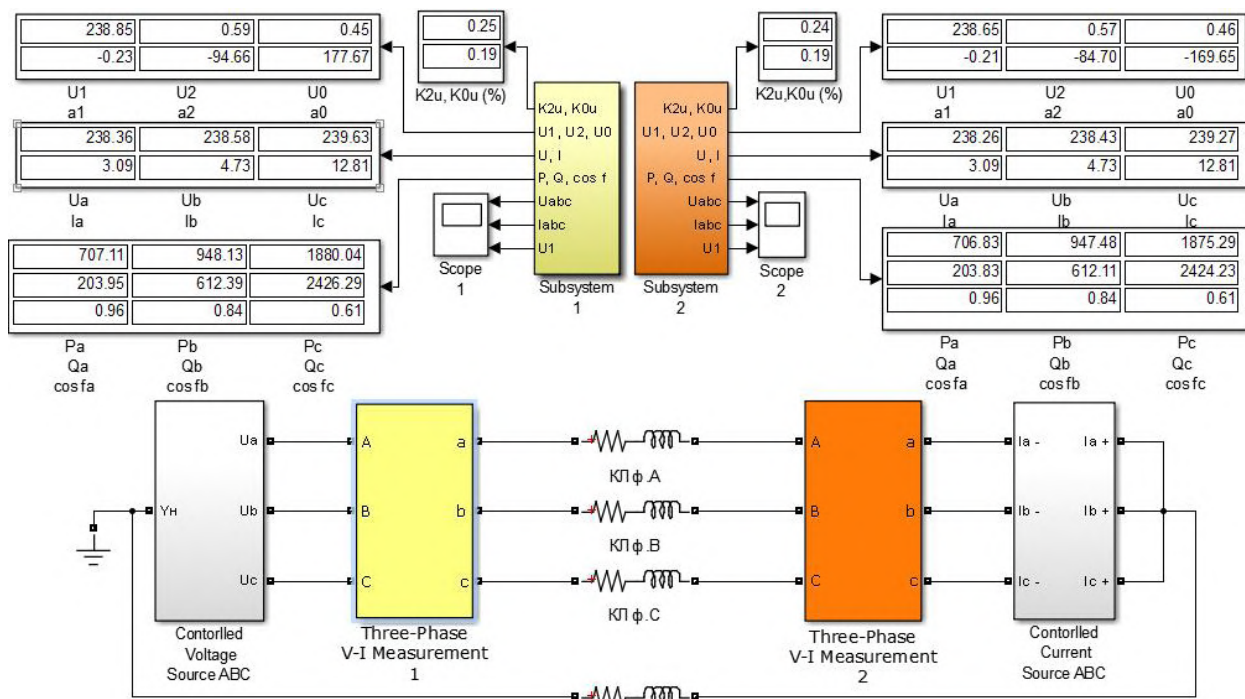


Рис. 1. Схема Simulink-модели системы электроснабжения для исследования длительных несимметричных режимов

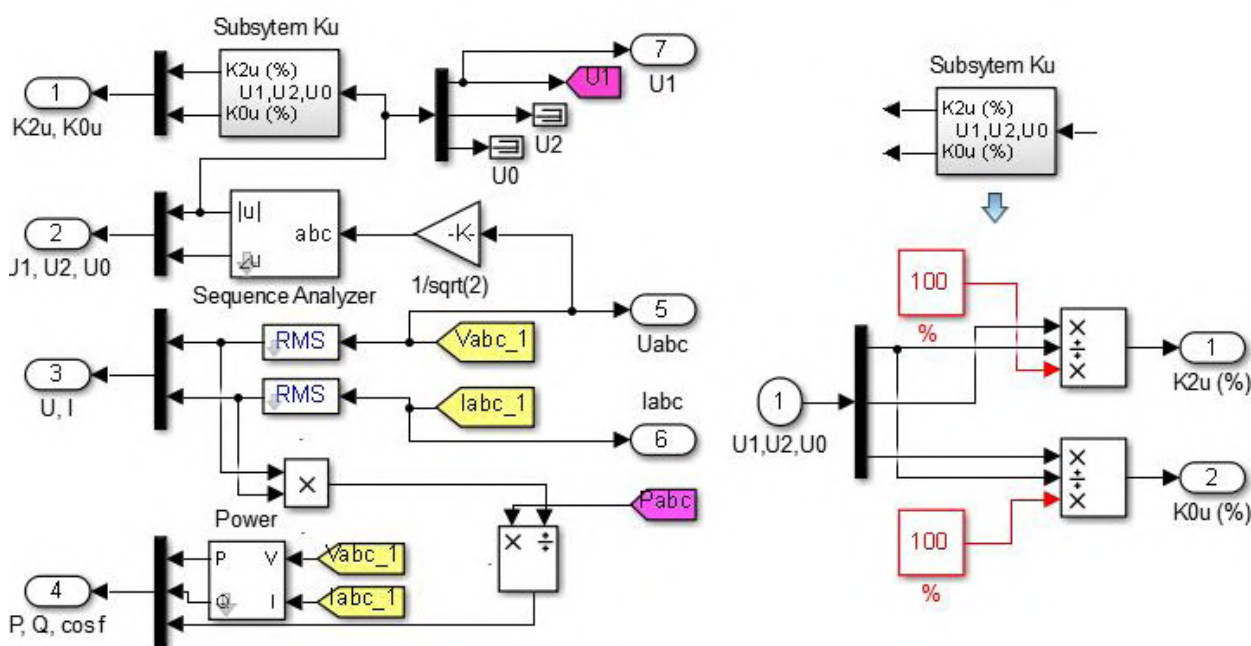


Рис. 2. Алгоритм-схема подсистем Subsystem 1 и Subsystem K_u

Уровень несимметрии напряжений в модели определяется при помощи блока Subsystem K_u , встроенного в подсистемы Subsystem 1 и Subsystem 2, в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии» из выражений (1) и (2) [2]:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\% ; \quad (1)$$

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где U_2 — значение напряжений обратной последовательности; U_0 — значение напряжений нулевой последовательности; U_1 — значение напряжения прямой последовательности.

Значения симметричных составляющих различных последовательностей напряжений (U_1 , U_2 , U_0), необходимые для определения соответствующих коэффициентов, определяются при помощи стандартного блока Simulink Sequence Analyzer [1]. Содержание подсистем Subsystem 1 и Subsystem K_u показано на рис. 2.

Длительный несимметричный режим работ моделируется компонентами Controlled Voltage Source ABC и Controlled Current Source ABC, с помощью

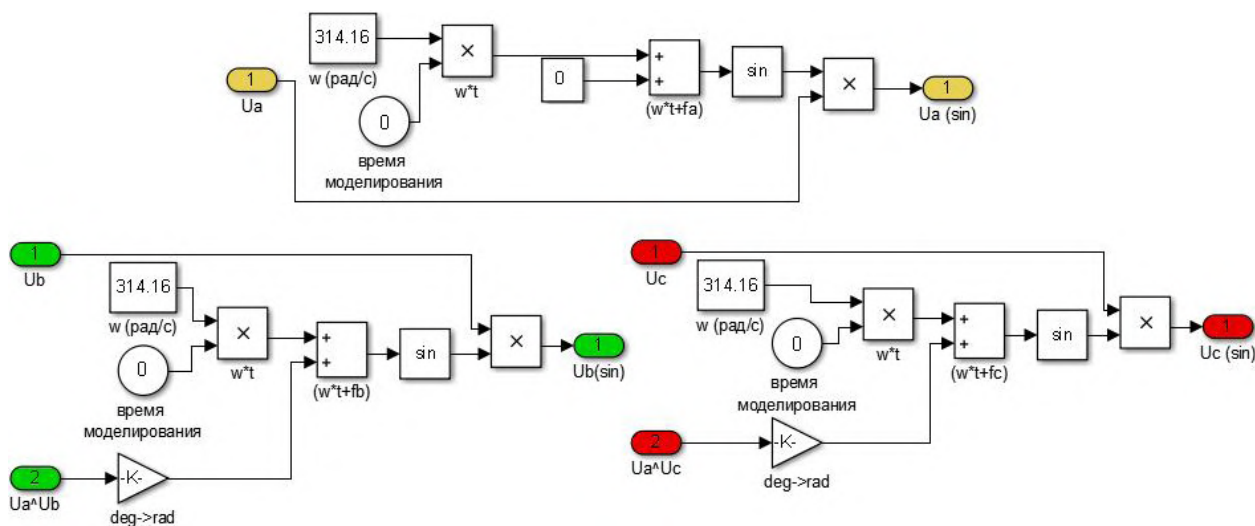


Рис. 3. Структурная схема блока, формирующего сигнал тока фаз А, В, С подсистемы Controlled Current Source ABC

алгоритма на основе блоков управляемых источников напряжения (рис. 3) и управляемых источников тока. При моделировании режима задаются реальные графики нагрузок, полученные в ходе проведения измерений основных энергетических показателей действующей системы электроснабжения.

Блок Controlled Voltage Source ABC вырабатывает синусоидальное напряжение с переменной амплитудой, в соответствии с выражением:

$$U_n = U_{ampn} \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_{Un}), \quad (3)$$

где U_{ampn} — амплитуда напряжения источника; f — частота; t — время моделирования режима; φ_{Un} — начальная фаза напряжения.

Уравнение (3) в модели реализуется, с учетом значений экспериментальных данных, в подсистеме, структура которой представлена на рис. 3.

Значения амплитуды выходного напряжения источника, а также значения его фазы задаются через блок Signal Builder, который позволяет с помощью графических средств задать необходимую форму сигналов, подаваемых на выходы данного блока.

Работу нагрузки моделирует блок Controlled Current Source ABC, имитирующий потребление синусоидального тока с переменной амплитудой согласно выражения:

$$I_n = I_{ampn} \cdot \sin(2\pi ft \pm \varphi_{In}), \quad (4)$$

где I_{ampn} — амплитуда выходного тока источника; f — частота источника; t — время моделирования режима; φ_{In} — начальная фаза тока.

Необходимые значения величин амплитуд токов и их начальных фаз, задаются аналогично уровням напряжения при помощи блока Signal Builder.

Общеизвестно, что в электрических сетях напряжением 0,4 кВ существует проблема, определяемая отклонением напряжений в фазах от номинальных (нормативных) значений. В свою очередь, отклонения уровней напряжения от требуемых параметров приводят к нарушению нормальной (устойчивой) работы и снижению срока службы электрооборудования, в том числе и к перерасходу электрической энергии [3, 4].

Представленная модель, как упоминалось выше, является базовой для моделирования и проведения

исследований длительных несимметричных режимов систем электроснабжения. Результаты моделирования позволят оперативно и с необходимой достоверностью определять как возможные уровни несимметрии в характерных точках системы, так и уровни дополнительных потерь мощностей, возникающих в различных элементах системы электроснабжения, и принимать решение о рациональном (оптимальном) распределении нагрузок либо о применении симметрирующих устройств.

Библиографический список

1. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. — М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. — 288 с.
2. ГОСТ 30804.4.30—2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. — Введ. 2014—01—01. — М. : Стандартинформ, 2013. — 52 с.
3. Дед, А. В. Оценка дополнительных потерь мощности в электрических сетях 0,38 кВ на основе экспериментальных данных / А. В. Дед [и др.] // Успехи современного естествознания. — 2014. — № 11—3. — С. 64—67.
4. Дед, А. В. Расчет дополнительных потерь мощности от воздействия несимметрии напряжений и токов в элементах электрических сетей [Электронный ресурс] / А. В. Дед, [и др.] // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — №. 5. — Режим доступа: <http://www.science-education.ru/119-15249> (дата обращения: 18.09.2015).

ДЕД Александр Викторович, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры физики.

ПАРШУКОВА Александра Витальевна, магистрант гр. ЭЭМ-142 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: ded_av@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.09.2015 г.

© А. В. Дед, С. В. Бирюков, А. В. Паршукова

МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НА ГЕРКОНЕ

Предложена простая конструкция максимальной токовой защиты на герконе МТЗГ электрических линий и устройств, сменные элементы которой дешевы и позволяют с успехом использовать ее для защиты от коротких замыканий в широком диапазоне рабочих токов там, где отсутствуют трансформаторы тока или невозможна их установка. Для реализации МТЗГ разработана математическая модель магнитного поля плоской шины, которая позволяет с высокой точностью рассчитывать параметры МТЗГ и оценивать влияние на геркон этой защиты токов в шинах соседних фаз. Приведены параметры сменных элементов, а также пример расчета и установки порога срабатывания МТЗГ.

Ключевые слова: релейная защита, максимальная токовая защита на герконе, математическая модель магнитного поля шины.

Наиболее часто для релейной защиты электрических линий и устройств от коротких замыканий используется максимальная токовая защита. Как правило, для ее реализации необходим датчик тока и реагирующий орган. Обычно их роль выполняют трансформатор тока и токовое реле [1, 2]. Однако установить такую защиту удастся не на все электрические линии и устройства. Это вызвано тем, что часть из них не имеет трансформаторов тока, а на другие установить трансформаторы тока не удастся из-за их конструктивных особенностей.

С другой стороны, вопрос о переходе с трансформаторов тока на другие датчики тока настолько значителен, что в 2001 году он рассматривался специально на 38-й сессии СИГРЭ в Париже на заседании, посвященном теме замены трансформаторов тока и напряжения новыми датчиками тока и напряжения и влиянию их на проектирование защит.

В ряде случаев эту проблему может решить датчик тока в виде геркона с обмоткой [3, 4]. Примером использования такого датчика может служить также максимальная токовая защита на герконе (МТЗГ), которая разработана на кафедре «Электроэнергетика» в Павлодарском государственном университете для установки ее ячейке комплектного распределительного устройства (КРУ) на рабочее напряжение 6 кВ. Конструкция МТЗГ приведена на рис. 1.

В МТЗГ датчик тока выполнен в виде сменного элемента, обеспечивающего работу защиты в заданном диапазоне рабочих токов в шине 1. Он представляет собой пластину 2 из стеклотекстолита с печатной схемой, в которую впаян геркон 3 с обмоткой 4. В предлагаемой конструкции для этого использовалось герконовое реле РЭС55А [5]. Число сменных элементов МТЗГ и диапазон их

рабочих токов зависит от геометрических размеров МТЗГ, а следовательно, от рабочего напряжения в КРУ. Для защиты сменного элемента от напряжения в шине используется электроизолирующий корпус 5. Его крепление к несущей конструкции 6 КРУ осуществляется с помощью кронштейна 7 и болтов 8 с гайками 9. Такое крепление корпуса позволяет осуществить поворот вокруг оси 10.

Размеры МТЗГ в основном определены высотой d_1 опорного изолятора равной 130 мм. При этом высота корпуса защиты D и толщина шины $h_{ш}$ составляли 120 мм и 10 мм, а расстояние между шинами $l_{ш}$ — 300 мм. Размещение МТЗГ в КРУ показано на рис. 2, где 10 — опорный изолятор.

Расстояние d для каждого диапазона рабочих токов определяется по расчетной схеме на рис. 3, при этом магнитное поле от тока $I_{ш}$ в шине рассчитывается приближенно как магнитное поле от N элементов с током $I_э = I_{ш} / N$, который сосредоточен в центре этого элемента.

Известно, что срабатывание геркона вызывает напряженность магнитного поля H_r , которая направлена вдоль оси его магнитной системы. Если допустить, что шина имеет бесконечную длину, то в соответствии с рис. 1 и 3 по закону Био — Савара — Лапласа [6] напряженность магнитного поля

$$H_r = H_y \sin \alpha = \sum_{n=1}^N \frac{I_э d}{2\pi r_n^2} \sin \alpha, \quad (1)$$

где α — угол между направлением тока в шине и осью магнитной системы геркона;
 $r_n = \sqrt{d^2 + (y_n - y)^2}$.

Результаты моделирования НГ при токе в шине $I_{ш} = 1000$ А для различных значений ширины шины

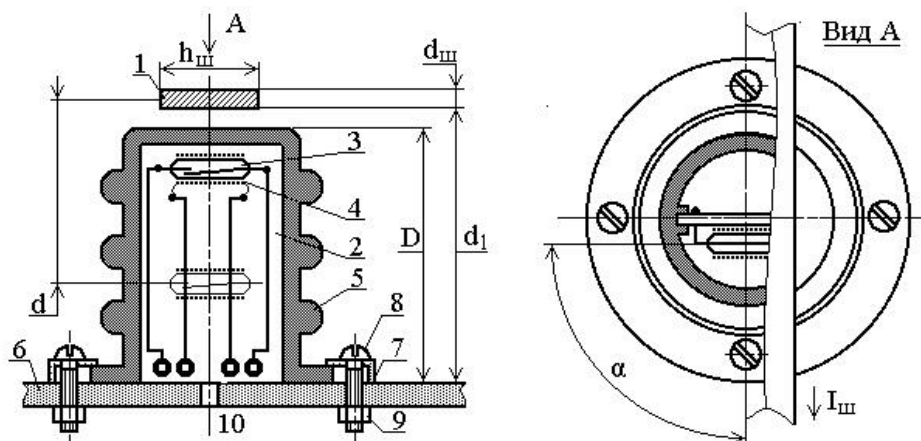


Рис. 1. Максимальная токовая защита на герконе

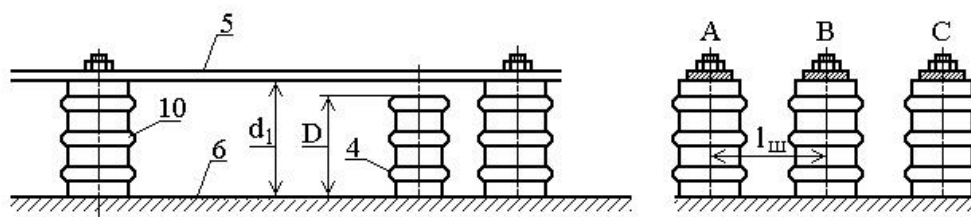


Рис. 2. Взаимное расположение защиты и токоведущей шины

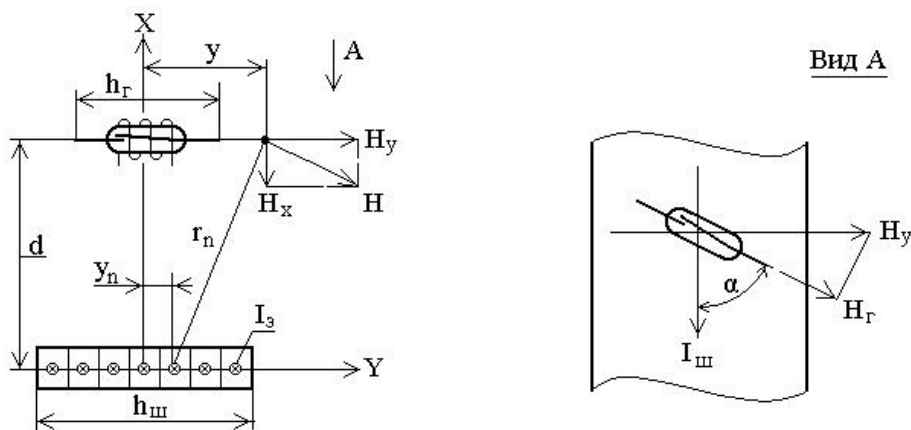


Рис. 3. Расчетная схема для моделирования магнитного поля шины

$h_{ш}$ и расстояния d приведены на рис. 4. Здесь линии 1 и 2 построены для шин шириной 0,06 м и 0,10 м при величине d , равной 0,03 м, кривые 3 и 4 для тех же шин на расстоянии d , равном 0,13 м.

Из рис. 4 видно, что величина H_y в области размещения магнитной системы геркона неодинакова. Поэтому при расчете параметров защиты следует использовать ее среднее значение $H_{y,ср}$, показанное для линии 1.

По рисунку 4 можно также оценить величину влияния на магнитную систему этого геркона магнитных полей от токов в соседних шинах. Так, по линии 1 напряженность поля от собственной шины составляет 3411 А/м, а от соседней — 67,8 А/м.

То есть, если в расчетах не учитывать влияние соседних фаз, то погрешность составит порядка 1,9 %. Очевидно, с ростом величины d эта погрешность возрастает.

Избавиться от этой погрешности можно, если напряженность магнитного поля геркона определять как

$$\dot{H}_r = \dot{H}_{rA} + \dot{H}_{rB} + \dot{H}_{rC}, \quad (2)$$

где \dot{H}_{rA} , \dot{H}_{rB} и \dot{H}_{rC} — напряженности магнитного поля геркона от токов в шинах фаз А, В и С которые определяются по рис. 4.

В соответствии с [3, 7] напряженность магнитного поля, при которой происходит замыкание контактов геркона, можно определить как

$$H_{ср,г} = I_{ср,ор} \cdot w_{ор} / h_{ор}, \quad (3)$$

где $w_{ор}$ и $h_{ор}$ — число витков и длина обмотки геркона; $I_{ср,ор}$ — величина тока в обмотке геркона, при котором происходит его срабатывание.

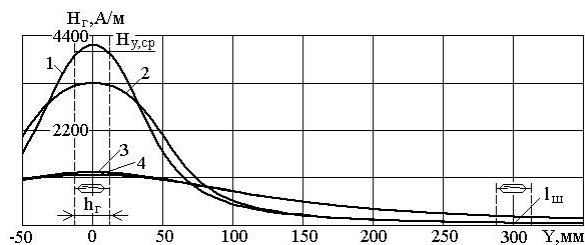


Рис. 4. Зависимость тока в шине, который вызывает срабатывание геркона на расстоянии d

Таблица 1

Параметры сменных элементов защита МТЗГ

Номер сменного элемента	1	2
Расстояние d, мм	30	120
Минимальный ток срабатывания $I_{cs,min}$, А	898	2831

Для используемого в защите герконового реле РЭС55А напряженность магнитного поля $H_{cp,r}$ составила 3667 А/м. При этом действующее значение ЭДС $E_{cp,r'}$ индуцированное в обмотке геркона составило 0,495 В. С учетом параметров реле РЭС55А и зависимостей на рис. 4 в этой максимальной токовой защите можно использовать только два сменных элемента. Их параметры приведены в табл.1.

Для максимальной токовой защиты по [2] ток срабатывания

$$I_{cs} = k_n \cdot k_3 \cdot I_{n,max'} \quad (4)$$

где $I_{n,max}$ — максимальное значение тока в нормальном режиме работы; k_3 — коэффициент защиты, который зависит от типа нагрузки и принимается соответственно равным кратности пускового тока асинхронного двигателя или отношению броска тока намагничивания трансформатора к его номинальному значению; k_n — коэффициент надежности, который принимают равным 1,7–2, используют для учета неточности расчета параметров защиты и разброса величин намагничивающей силы срабатывания реле геркона РЭС55А.

Сменный элемент выбирают по величине его минимального тока срабатывания $I_{cs,min}$ из табл. 1. Если $898 \text{ A} < I_{cs,min} < 2831 \text{ A}$, то используется первый сменный элемент, а при $I_{cs,min} > 2831 \text{ A}$ — второй. Выставление требуемого тока защиты срабатывания осуществляется поворотом корпуса устройства защиты на угол

$$\alpha = \arcsin (I_{cs,min} / I_{cs}) \quad (5)$$

Контролируют точность отстройки защиты по величине ЭДС в обмотке реле в режиме номинальной нагрузки.

Коэффициент чувствительности защиты

$$k_q = I_{k,min} / I_{cs'} \quad (7)$$

где $I_{k,min}$ — минимальное значение тока короткого замыкания [2].

Таким образом, например, для защиты асинхронного двигателя АД4 с номинальным током

$I_{n,max} = 90 \text{ A}$ и кратностью пускового тока 5,5 при коэффициенте $k_n = 2$ для МТЗГ

$$I_{cs} = k_n k_3 I_{cs} = 2,0 \cdot 5,5 \cdot 90 = 990 \text{ A.}$$

В соответствии с табл. 1 и приведенными рекомендациями в защите АД4 следует использовать сменный элемент № 1. При этом угол поворота корпуса МТЗГ

$$\alpha = \arcsin (I_{cs,min} / I_{cs}) = \arcsin (898/990) = 65,1^\circ.$$

Точность контроля установки порога срабатывания МТЗГ контролируется по величине ЭДС обмотки геркона в режиме нагрузки, которую определяют как

$$E_r = E_{cp,r} / (k_n k_3) \sin \alpha = 0,49 / (2,0 \cdot 5,5) \sin 65,1 = 0,0403 \text{ В.}$$

Как показали лабораторные исследования опытного образца МТЗГ, он вполне отвечает требованиям, которые предъявляют к максимальным токовым защитами [1, 2].

Расширить область рабочих токов МТЗГ можно за счет использования герконов с более низкой напряженностью магнитного поля срабатывания $H_{cp,r'}$ а также путем подмагничивания геркона постоянным магнитом [4] или с помощью обмотки, подключаемой к источнику оперативного тока.

Подмагничивание постоянным магнитом легко осуществить, если вместо реле РЭС55А использовать, например, поляризованное герконовое реле РПС-50 [5] или схему размещения магнита, используемую в [4]. Следует добавить, что особенностью МТЗГ является то, что она достаточно просто может интегрироваться в качестве датчика тока в защиты на микропроцессорной базе [8].

Выводы

1. Предложенная максимальная токовая защита МТЗГ проста по конструкции, а ее сменные элементы дешевы, что позволяет с успехом использовать ее для защиты от коротких замыканий в широком диапазоне рабочих токов там, где отсутствуют трансформаторы тока или невозможна их установка.

2. Разработанная математическая модель магнитного поля шины дает возможность с высокой точностью рассчитывать параметры МТЗГ и оценивать влияние на геркон этой защиты токов в шинах соседних фаз.

Библиографический список

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем / А. М. Федосеев. — М. : Энергия, 1976. — 559 с.
2. Беркович, М. А. Основы техники релейных защит / М. А. Беркович, В. В. Молчанов, В. А. Семенов. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 232 с.
3. Новожилов, А. Н. Применение герконов для защиты асинхронных двигателей от витковых замыканий / А. Н. Новожилов // Электричество. — 1990. — № 2. — С. 52–55.
4. Чувствительная защита от замыканий ТТНП с герконом / К. И. Никитин, А. Н. Новожилов, Д. А. Кудабаяв, Т. А. Новожилов, О. А. Сидоров // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 210–213.
5. Игловский, И. Г. Справочник по слаботочным электрическим реле / И. Г. Игловский, Г. В. Владимиров. — Л. : Энергоатомиздат, 1990. — 560 с.

6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. — М. : Высшая школа, 1967. — 775 с.

7. Новожилов, А. Н. Способ защиты обмотки ротора синхронного генератора от витковых замыканий на двух индукционных преобразователях / А. Н. Новожилов, В. Н. Горюнов, В. И. Полищук, М. П. Воликова, Т. А. Новожилов // Электричество. — 2010. — № 8. — С. 64–67.

8. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В. А. Андреев. — М. : Высшая школа. — 1991. — 495 с.

НОВОЖИЛОВ Тимофей Александрович, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

НОВОЖИЛОВ Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры электроэнергетики Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова, Республика Казахстан.

ПОПОВ Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры теоретической и общей электротехники ОмГТУ.

МАЛИНИН Никита Витальевич, студент гр. КЗИ-141 радиотехнического факультета ОмГТУ.

Адрес для переписки: timokvey@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.09.2015 г.

© Т. А. Новожилов, А. Н. Новожилов, А. П. Попов, Н. В. Малинин

УДК 699.865

**П. В. ПЕТРОВ
Е. М. РЕЗАНОВ
В. Р. ВЕДРУЧЕНКО
А. П. СТАРИКОВ**

Омский государственный
университет путей сообщения

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ

Предложена методика и алгоритм определения оптимальной толщины утепляющего слоя ограждающих конструкций здания при капитальном ремонте. Научная разработка учитывает нормативные документы по тепловой защите зданий и обоснование применяемых экономических решений. Обоснована целесообразность применения предложенного алгоритма, позволяющего снизить приведенные затраты теплосберегающих мероприятий при капитальном ремонте зданий.

Ключевые слова: эффективность, затраты, тепловая энергия, теплопередача, толщина ограждений, температура.

В настоящее время в сфере жилищного фонда обострилась проблема капитального ремонта с проведением активной энергосберегающей политики, целью которой является одновременное снижение капитальных затрат и энергоресурсов.

Указанное направление базируется на Федеральных законах РФ № 399-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности ...» от 28 декабря 2013 года и № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30 декабря 2009 года.

Главным условием эффективности теплосбережения в зданиях при капитальном ремонте является повышение теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Данные тепловизионных обследова-

ний зданий позволяют заключить, что на наружные стены приходится до 30 % потерь тепловой энергии, на светопрозрачные ограждения — 25 %, на пол и потолок — 5 % и 40 % — расход тепла на нагрев инфильтруемого наружного воздуха [1].

Применение теплозащитных материалов способствует снижению тепловых потерь, но отсутствие методологии оптимального выбора толщины утепляющего слоя ограждающих конструкций зданий при капитальном ремонте приводит к повышенным приведенным затратам.

Предложенный в работе [2] принцип формирования математической модели оптимизации оптимального выбора толщины утепляющего слоя ограждающих конструкций зданий при капитальном ремонте не имеет методической завершенности.

С другой стороны, выбор толщины утеплителя ограждающих конструкций зданий с технико-экономической позиции, должен осуществляться при определении минимума приведенных затрат в условиях экономической динамики.

Представленная математическая модель оптимизации в [2] для капитального ремонта зданий требует доработки с учетом нормативных документов по тепловой защите зданий и экономическому обоснованию применяемых экономических решений [3–5].

Принципиально важным методическим положением является выбор сопоставимых условий оптимизации: соблюдение заданных параметров в помещении здания, выходных параметров, надежности работы систем и т.п., определяемых характерными особенностями конкретной задачи.

Оценку эффективности того или иного решения производят по критерию оптимальности. Формирование критериев эффективности является актуальным и перспективным направлением в области технико-экономического анализа. Критерий оптимальности (функция цели) является выражением результата действия процесса. Значение критерия оптимальности численно характеризует свойство одного из наиболее важных технико-экономических показателей проектируемого объекта. Этот критерий, показывающий относительное предпочтение одного варианта по отношению к другим, определяет цель проектирования и вместе с управляемыми параметрами и описанием допустимой области их изменения образует математическую модель принятия решений в задаче оптимального проектирования здания при капитальном ремонте. При математическом моделировании критерий оптимальности должен быть выражен математически, как функция внешних и внутренних параметров. Критерий оптимальности должен быть количественным, иметь ясный физический смысл, должен быть эффективным с точки зрения достижения цели.

Сравнительная эффективность инноваций в экономической теории, согласно положениям методики капитальных вложений, является основной количественной оценкой при выборе оптимального варианта [6], р./год:

$$И = С + К \cdot E, \quad (1)$$

где И — приведенные дисконтированные затраты, р./год; С — ежегодные эксплуатационные расходы, р./год; К — инвестиции в мероприятия (капитальные вложения), р.; E — коэффициент эффективности инвестиций, 1/год:

$$E = \frac{r}{1 - \text{EXP}(-r \cdot T_{\text{ок}})}, \quad (2)$$

где r — норма дисконта [7], $T_{\text{ок}}$ — срок окупаемости с учетом инфляционной составляющей [2], лет:

$$T_{\text{ок}} = - \frac{\ln(1 - T_0 \cdot (\frac{i}{100}))}{\ln(1 + (\frac{i}{100}))}, \quad (3)$$

где i — процент инфляционной составляющей, %; T_0 — бездисконтный срок окупаемости инвестиций за счет номинальной величины дохода [6], лет:

$$T_0 = \frac{K}{\Delta \mathcal{E}}, \quad (4)$$

где $\Delta \mathcal{E}$ — доход за счет экономии энергоресурсов в течение срока эксплуатации проведенного мероприятия (экономический эффект), р./год.

Экономический эффект за счет утепления ограждающих конструкций здания можно определить по выражению, р.:

$$\Delta \mathcal{E} = \Pi_{\text{т}} \cdot \Delta Q, \quad (5)$$

где $\Pi_{\text{т}}$ — тариф на тепловую энергию, р./Дж; ΔQ — экономия тепловой энергии за счет энергосберегающего мероприятия [8], Дж/год:

$$\Delta Q = 0,0864 \cdot 10^6 \cdot D_d \cdot F \cdot (k_1 - k_2), \quad (6)$$

где D_d — градусо-сутки отопительного периода [3], $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$; k_1, k_2 — приведенные коэффициенты теплопередачи здания до и после внедрения мероприятия, Вт/($\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$); F — площадь поверхности наружных ограждающих конструкций здания, м^2 .

Приведенный коэффициент теплопередачи через ограждающие конструкции можно определить по формуле, Вт/($\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$):

$$k = \frac{1}{R_0 \cdot r_0} = \frac{1}{(\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}) \cdot r_0}, \quad (7)$$

где R_0 — осредненное по площади условное сопротивление теплопередаче выделенной ограждающей конструкции [3], ($\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)/Вт; r_0 — коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции, учитывающий влияние стыков, откосов проемов, обрамляющих ребер, гибких связей и других теплопроводных включений [3, 4]; α_1, α_2 — коэффициенты теплоотдачи внутренней и внешней поверхности ограждающих конструкций [3], Вт/($\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$); δ_i — толщина i-го слоя ограждающей конструкции, м; λ_i — теплопроводность i-го слоя ограждающей конструкции, Вт/($\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}$).

Выражение для капиталовложений в теплосберегающие мероприятия по утеплению ограждающих конструкций здания можно представить в виде, р.:

$$K = \Pi_{\text{ут}} \cdot \delta_{\text{ут}} \cdot F + \Pi_{\text{раб}} \cdot F, \quad (8)$$

где $\Pi_{\text{ут}}$ — стоимость 1 м^3 утепляющего материала, р./ м^3 ; $\Pi_{\text{раб}}$ — стоимость 1 м^2 работ по утеплению ограждающих конструкций здания с учетом прочих расходов, р./ м^2 ; $\delta_{\text{ут}}$ — толщина утепляющего материала, м.

Подставив выражения (5)–(8) в уравнение (4), получим бездисконтный срок окупаемости инвестиций в утепление ограждающих конструкций здания, лет:

$$T_0 = \frac{(\Pi_{\text{ут}} \cdot \delta_{\text{ут}} + \Pi_{\text{раб}}) \cdot (R_{\text{уст}})^2 \cdot r_0 + (R_{\text{уст}}) \cdot \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}}}{0,0864 \cdot 10^6 \cdot D_d \cdot \Pi_{\text{т}} \cdot (R_{\text{уст}}) \cdot [r_0 - 1] + r_0 \cdot \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}}}, \quad (9)$$

где $\lambda_{\text{ут}}$ — теплопроводность утепляющего слоя ограждающей конструкции, Вт/($\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}$); $R_{\text{уст}}$ — установленное сопротивление теплопередаче однородной ограждающей конструкции здания, ($\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)/Вт:

$$R_{\text{уст}} = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i^{\text{уст}}}{\lambda_i^{\text{уст}}} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \quad (10)$$

где $\delta_i^{\text{уст}}$ — толщина (i-го) слоя установленной ограждающей конструкции, м; $\lambda_i^{\text{уст}}$ — теплопроводность

(i-го) слоя установленной ограждающей конструкции, Вт/(м·°C).

Ежегодные эксплуатационные расходы по утеплению ограждающих конструкций здания при капитальном ремонте обусловлены потерями тепловой энергии, отчислениями на амортизационную реновацию и обслуживание, определяются из уравнения [6], р./год:

$$C = Z_T + Z_a + Z_o, \quad (11)$$

где Z_T — затраты, обусловленные потерями тепловой энергии через ограждающие конструкции здания, р./год; Z_a — амортизационные отчисления на реновацию, р./год; Z_o — стоимость ежегодного обслуживания, р./год.

Затраты обусловленные потерями тепловой энергии через ограждающие конструкции здания определяются из выражения [6], р./год:

$$Z_T = Q \cdot \Pi_T, \quad (12)$$

где Q — годовой объем тепловой энергии рассеиваемой в окружающую среду от ограждающих конструкций здания, Дж/год.

Амортизационные отчисления на реновацию и стоимость ежегодного обслуживания ограждающих конструкций здания нормируется в виде определенного процента от капитальных вложений [6], р./год:

$$Z_a + Z_o = H_{\text{опр}} \cdot K, \quad (13)$$

где $H_{\text{опр}}$ — норма отчислений в относительных единицах на амортизацию и ежегодное обслуживание ограждающих конструкций здания, 1/год.

Подставим выражения (11)–(13) в уравнение (1), получим, дисконтированные затраты по утеплению ограждающих конструкций здания $I_{\text{опр}}$, р./год:

$$I_{\text{опр}} = Q \cdot \Pi_T + K \cdot (E + H_{\text{опр}}). \quad (14)$$

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции здания с учетом утепляющего слоя можно представить в виде, (м²·°C)/Вт:

$$R = r_0 \cdot (R_{\text{устр}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}}), \quad (15)$$

тогда годовой объем тепловой энергии рассеиваемой в окружающую среду от ограждающих конструкций здания определяется из выражения, Дж/год:

$$Q = \frac{0,0864 \cdot 10^6 \cdot D_d \cdot F}{r_0 \cdot (R_{\text{устр}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}})}. \quad (16)$$

Подставим выражения (8) и (16) в (14), получим:

$$I_{\text{опр}} = \frac{0,0864 \cdot 10^6 \cdot D_d \cdot F \cdot \Pi_T}{r_0 \cdot (R_{\text{устр}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}})} + (\Pi_{\text{ут}} \cdot \delta_{\text{ут}} \cdot F + \Pi_{\text{раб}} \cdot F) \cdot (E + H_{\text{опр}}). \quad (17)$$

Значение оптимальной толщины утепляющего слоя ограждающей конструкции здания можно найти исходя из минимума суммарных дисконтированных издержек $I_{\text{опр}}$ (16), при приравнивании к нулю

частных производных функции по оптимизируемому параметру:

$$\frac{\partial I_{\text{опр}}}{\partial \delta_{\text{ут}}} = 0. \quad (18)$$

После решения производной функции (17) по оптимизируемому параметру, получены выражения для определения оптимальной толщины утепляющего слоя ограждающей конструкции здания, м:

$$\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}, \quad (19)$$

где

$$a = (r_0)^2 \cdot (E + H_{\text{опр}}) \cdot \Pi_{\text{ут}}, \quad (20)$$

$$b = 2 \cdot R_{\text{устр}} \cdot a \cdot \lambda_{\text{ут}}, \quad (21)$$

$$c = (r_0 \cdot \lambda_{\text{ут}} \cdot R_{\text{устр}})^2 \cdot (E + H_{\text{опр}}) \times (\Pi_{\text{ут}} + \frac{\Pi_{\text{раб}}}{\lambda_{\text{ут}} \cdot R_{\text{устр}}}) - r_0 \cdot [\lambda_{\text{ут}} \cdot \Pi_T \cdot 0,0864 \cdot 10^6 \cdot D_d + r_0 \cdot R_{\text{устр}} \cdot (E + H_{\text{опр}}) \cdot \Pi_{\text{раб}}]. \quad (22)$$

Для соблюдения норм необходимо определять требуемую толщину утепляющего слоя ограждающих конструкций здания, удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции [3]:

$$\delta_{\text{тп}} = (\frac{R_{\text{нор}}}{r_0} - R_{\text{устр}}) \cdot \lambda_{\text{ут}}, \quad (23)$$

$$q = \frac{24 \cdot Q_h}{V \cdot D_d}, \quad (24)$$

$$\Delta t = \frac{(t_1 - t_2)}{R \cdot \alpha_1}, \quad (25)$$

где $\delta_{\text{тп}}$ — требуемая толщина утепляющего слоя ограждающих конструкций здания, м; $R_{\text{нор}}$ — нормативное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции здания [3], (м²·°C)/Вт; q — удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, Вт/(м³·°C); Q_h — общие тепловые потери здания за отопительный период [3], Вт; V — отапливаемый объем здания, м³; Δt — температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, °C; t_1 — расчетная температура внутреннего воздуха здания [3], °C; t_2 — расчетная температура наружного воздуха в холодный период года [9], °C.

На основании полученных выражений (2), (3), (8)–(10), (14)–(25) и блок-схемы (рис. 1) нами разработаны методика и алгоритм, определения оптимальной толщины утепляющего слоя ограждающих конструкций здания при капитальном ремонте, с учетом нормативных документов по тепловой защите зданий и экономического обоснования принятых решений.

Проведенные исследования показали, что значение оптимальной толщины утепляющего слоя ограждающих конструкций здания $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$, определен-

Сравнительные результаты разработанной методики расчета применительно к ограждающим конструкциям стен и условиям эксплуатации жилого пятиэтажного панельного здания в г. Омске

Данные, результаты	Наименование обозначения	Обозначение	Размерность	Значение
1	2	3	4	5
Экономические параметры	Норма дисконта	r	—	0,15
	Норма отчислений на амортизацию и ежегодное обслуживание	$H_{\text{ор}}$	1/год	0,011
	Процент инфляционной составляющей	i	%	8
	Стоимость 1 м ³ утепляющего материала	$C_{\text{ут}}$	р./м ³	2000
	Стоимость 1 м ² работ по утеплению ограждающих конструкций здания	$C_{\text{рб}}$	р./м ²	2500
	Тариф на тепловую энергию	$C_{\text{т}}$	р./Дж	$3,5834 \cdot 10^{-7}$
Теплотехнические параметры	Теплопроводность утепляющего слоя	$\lambda_{\text{ут}}$	Вт/(м·°С)	0,04
	Установленное сопротивление теплопередаче	$R_{\text{уст}}$	(м ² ·°С)/Вт	0,617
	Установленная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию	q	Вт/м ³⁰ С	0,494
	Нормативное сопротивление теплопередаче	$R_{\text{нор}}$	(м ² ·°С)/Вт	3,5
	Нормативная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию	$q_{\text{нор}}$	Вт/м ³⁰ С	0,359
	Нормируемый температурный перепад	$\Delta t_{\text{нор}}$	°С	4
	Градусо-сутки отопительного периода	D_d	°С·сут	6069,6
	Коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции	r_0	—	0,902
Параметры, предлагаемые при капитальном ремонте	Толщина утепляющего слоя	$\delta_{\text{ут}}$	м	0,05/0,1/0,15
	Сопротивление теплопередаче	R	(м ² ·°С)/Вт	1,66/2,8/3,93
	Приведенные дисконтированные затраты	$I_{\text{ор}}$	10 ⁵ Чр./год	7,52/7,11/7,08
	Бездисконтный срок окупаемости инвестиций	T_0	лет	13,8/11,8/11,4
	Срок окупаемости с учетом инфляции	$T_{\text{ок}}$	лет	-/37,5/31,8
	Коэффициент эффективности инвестиций	E	1/год	0,151
	Температурный перепад	Δt	°С	2/1,2/0,8
	Удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию	q	Вт/м ³⁰ С	0,38/0,34/0,32
Параметры по предложенной методике	Оптимальная толщина утепляющего слоя	$\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$	м	0,135
	Сопротивление теплопередаче	R	(м ² ·°С)/Вт	3,6
	Требуемая толщина утепляющего слоя	$\delta_{\text{тр}}$	м	0,131
	Температурный перепад	Δt	°С	0,9
	Приведенные дисконтированные затраты	$I_{\text{ор}}$	10 ⁵ Чр./год	7,06
	Коэффициент эффективности инвестиций	E	1/год	0,154
	Бездисконтный срок окупаемости инвестиций	T_0	лет	11,5
	Срок окупаемости с учетом инфляции	$T_{\text{ок}}$	лет	32,5
	Удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию	q	Вт/м ³⁰ С	0,324

ное по выражению (18), отвечает минимуму целевой функции (рис. 2).

Сравнительные результаты расчета применения предложенных разработок применительно к ограждающим конструкциям стен и условиям эксплуатации жилого пятиэтажного панельного здания

в г. Омске (отапливаемый объем 8200 м³, отапливаемая площадь 2545 м²), представлены в табл. 1.

Выводы. Разработана методика и алгоритм определения оптимальной толщины утепляющего слоя ограждающих конструкций здания при капитальном ремонте, с учетом нормативных докумен-

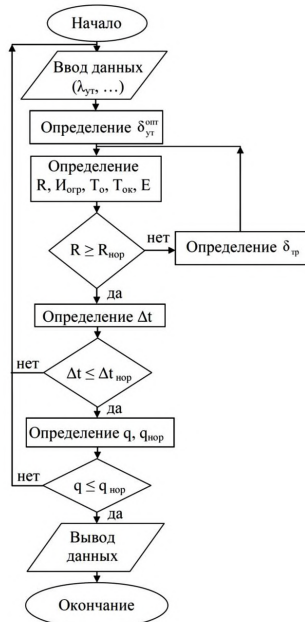


Рис. 1. Блок-схема определения оптимальной толщины утепляющего слоя ограждающих конструкций здания: $\Delta t_{\text{норм}}$ — нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции [3], °C; $q_{\text{норм}}$ — нормативная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию [3], Вт/(м²·°C).

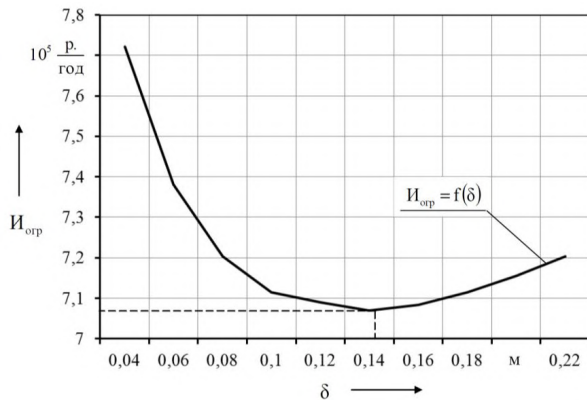


Рис. 2. Зависимость дисконтированных затрат от толщины утепляющего слоя ограждающих конструкций стен жилого здания

тов по тепловой защите зданий и экономическому обоснованию применяемых экономических решений. Результаты исследования подтверждают целесообразность его использования при проведении капитального ремонта.

1. Основные направления совершенствования тепловой работы зданий и сооружений при капитальном ремонте [Текст] / П. В. Петров [и др.] // КС Энергетика и ЖКХ. — 2015. — № 3 (34). — С. 30–33.

2. Ковалев, И. Н. Рациональные решения при экономическом обосновании теплозащиты зданий [Текст] / И. Н. Ковалев // Энергосбережение. — 2014. — № 8. — С. 14–19.

3. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий (Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003) [Текст]. — Введ. 2013–07–01. — М.: ФАУ «ФЦС», 2012. — 96 с.

4. ГОСТ Р 54851-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Конструкции строительные ограждающие неоднородные [Текст]. — Введ. — 2012–05–01. — М.: Стандартинформ, 2012. — 24 с.

5. Горшков, А. С. Об окупаемости инвестиций на утепление фасадов существующих зданий [Текст] / А. С. Горшков // Энергосбережение. — 2014. — № 4. — С. 12–19.

6. Шилкин, Н. В. Методы повышения тепловой эффективности зданий и их экономическая оценка [Текст]: дис. ... канд. архитектуры. — Н. Новгород, 2007. — 174 с.

7. Камнев, И. М. Методы обоснования ставки дисконтирования [Текст] / И. М. Камнев, А. Ю. Жулина // Проблемы учета и финансов. — 2012. — № 2 (6). — С. 30–35.

8. Совершенствование методики энергетического обследования систем теплоснабжения зданий бюджетных учреждений [Текст] / Е. М. Резанов [и др.] // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 3 (123). — С. 227–230.

9. СП 131.13330.2012. Строительная климатология (Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*) [Текст]. — Введ. 2013–01–01. — М.: НИИСФ РААСН, 2012. — 109 с.

ПЕТРОВ Павел Владимирович, аспирант кафедры теплоэнергетики Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС); заместитель директора ООО «Сибирская проектная компания», г. Омск.

РЕЗАНОВ Евгений Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики ОмГУПС.

ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры теплоэнергетики ОмГУПС.

СТАРИКОВ Александр Петрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой теплоэнергетики ОмГУПС.

Адрес для переписки: rezanove1@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.09.2015 г.

© П. В. Петров, Е. М. Резанов, В. Р. Ведрученко,

А. П. Стариков