

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор

Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Басараб М.А. — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Большаков А.А. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Буддакова Т.И. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)

Зинченко Л.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Зубов Н.Е. — д.т.н., проф., РКК «Энергия»
Кларк Р. — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик,
Великобритания)

Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МИРЭА — РТУ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП
им. Н.А. Пилюгина»

Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Проталинский О.М. — д.т.н., проф., НИУ МЭИ
Путилов В.Н. — ООО «Изд-во "Инновационное
машиностроение"» (заместитель
главного редактора)

Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во
"Инновационное машиностроение"»

Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)

Фу Ли — д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)

Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН,
президент МГТУ им. Н.Э. Баумана

Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т
науки и технологии (КНР)

Чистякова Т.Б. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)

Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.
центр им. В.П. Чкалова

Редакторы — Мырзина И.Н., Селихова Е.А.

Компьютерная вёрстка — Конова Е.В.

Адрес редакции:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.

Тел.: 8 (499) 268-41-77.

E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;

http://www.mashin.ru

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г.
(ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК
при Минобрнауки России изданий для публикации трудов
соискателей учёных степеней, а также в систему Россий-
ского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Издаётся с 1947 г.

Том 75

10 2021

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А. Возможности
использования технологий FACTS в энергосистеме и её при-
ложения 435

Гаврилов А.И., До М.Ч., Тун Н.Л. Современные методы от-
слеживания сварных швов на основе лазерного зрения для
роботизированной сварки 442

Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Брюхо-
вецкий А.Н., Никитин В.В. Автоматизированное проекти-
рование продольного профиля лесовозных автомобильных
дорог с учётом влияния зрительно плавных и изломанных
линий 450

Дьяков И.Ф., Моисеев Ю.В. Анализ энергозатрат при про-
ектировании автотранспортного средства 454

Затонский А.В., Федосеева К.А. Модификация алгоритма
синхронизации видеосъёмки флотационной машины с поло-
жением пеногона 458

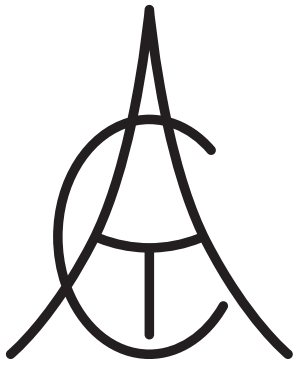
Микаева С.А., Микаева А.С., Журавлёва Ю.А., Дюкин А.А.
Кварцеводувный стол и газовая горелка 462

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Лапин А.В. Аналитический син-
тез инвариантного по углу тангажа управления продольным
движением вертолёта 467

Кузнецов Е.А., Нестеркина Н.П., Журавлёва Ю.А. Разра-
ботка проекта архитектурного освещения фасада здания
«Дворец культуры» 473

Джавадов Н.Г., Асадов Х.Г., Казымлы Р.В. Исследование
влияния метеорологических факторов на ослабление радио-
сигнала в атмосферных распределённых сетях передачи ин-
формации 477



Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Chief in Editor

Shakhnov V.A. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,
MSTU behalf of N.E. Bauman

EDITORIAL COUNCIL:

- Afanasyev V.N.** – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE
Basarab M.A. – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Bolshakov A.A. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)
Buldakova T.I. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China
Zinchenko L.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Zubov N.E. – dr.en.s., prof., RSC «Energy»
Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK
Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa
Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan
Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE
Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MIREA—RTU
Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS
Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP
behalf of N.A. Pilyugin»
Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Protalinsky O.M. – dr.en.s., prof., NRU MPEI
Putilov V.N. – LLC «Innovative Mashinostroenie»
Publishers» (deputy chief editor)
Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Innovative
Mashinostroenie» Publishers»
Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China
Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China
Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician of RAS, President
of MSTU behalf of N.E. Bauman
He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science
and Technology, P.R. China
Chistyakova T.B. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)
Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center
behalf of V.P. Chkalov

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**
Computer layout — **Konova E.V.**

Editorial address:

107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2
Tel.: +7 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Founder:

LLC «INNOVATIVE MASHINOSTROENIE» PUBLISHERS»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014 (PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian index scientific citation (RINC)

It is published since 1947

Volume 75 $\frac{10}{2021}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

- Yangirov I.F., Khalikov A.R., Safiullin R.A.** Possibilities of using
FACTS technologies in the power system and its applications . . . 435
- Gavrilov A.I., Do M.Ch., Tun N.L.** Modern tracking methods of
the weld seams for robotic welding based on laser vision 442
- Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Vysotskaya I.A., Bryukho-
vetskiy A.N., Nikitin V.V.** Computer-aided design of the longitudi-
nal profile for logging highways, taking into account the influence
of visually smooth and broken lines 450
- Dyakov I.F., Moiseev Yu.V.** Analysis of energy consumption in the
design of a vehicle 454
- Zatonskiy A.V., Fedoseeva K.A.** Modification of the synchroniza-
tion algorithm for the flotation machine video filming with position
of the foam extinguisher 458
- Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Zhuravleva Yu.A., Dyukin A.A.**
Quartz table and gas burner 462

MODERN TECHNOLOGIES

- Zubov N.E., Ryabchenko V.N., Lapin A.V.** Analytical synthesis
of the pitch-invariant control of the helicopter longitudinal motion
with invariance of a pitch angle 467
- Kuznetsov E.A., Nesterkina N.P., Zhuravleva Yu.A.** Develop-
ment of a project for façade architectural lighting of the building
«Palace of Culture» 473
- Dzhavadov N.G., Asadov H.G., Kazimly R.V.** Research of the influ-
ence of meteorological factors on attenuation of the radio signal in
atmospheric distributed information transmission networks 477



УДК 621.313.13

И.Ф. Янгиров, д-р техн. наук, доц., **А.Р. Халиков**, канд. физ.-мат. наук, доц.
(Уфимский государственный авиационный технический университет),
Р.А. Сафиуллин, канд. физ.-мат. наук, доц.
(Нефтекамский филиал Башкирского государственного университета)

yangirov@yandex.ru

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ FACTS В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ И ЕЁ ПРИЛОЖЕНИЯ

Описаны структурные характеристики устройств, составляющих энергоэффективную технологию FACTS — составной части SmartGrid. Рассмотрены общие принципы, структурные элементы функционирования данной системы и возможности использования её устройств в энергосистеме Республики Башкортостан.

Ключевые слова: электроэнергетика; энергоэффективность; технологии FACTS; SmartGrid.

The structural characteristics of devices implementing the energy-efficient FACTS technology, which is an integral part of SmartGrid, are described. The general principles, structural elements of the functioning of this system and the possibility of using its devices in the power system of the Republic of Bashkortostan are considered.

Keywords: electric power industry; energy efficiency; FACTS technologies; SmartGrid.

Введение. В настоящее время электроэнергетика является одной из основных эффективных систем отраслей промышленности и ключевым фактором для функционирования других отраслей экономики страны. Именно в данной отрасли внедряются новые инновационные технологии при выработке, перераспределении и эксплуатации электроэнергии, создании новых электрических аппаратов и оборудования [1—6]. Обширные территории — горные хребты, речные перепады и естественные ресурсы России позволяют генерировать большое количество электроэнергии. Например, сейчас в России электроэнергию вырабатывают более 500 электростанций общей мощностью 200 тыс. МВт. Они интегрированы в ЕЭС России, управляются государством, частными генерирующими компаниями и выполняют генерирующие, электросетевые и электросбытовые функции. Скачкообразное развитие инновационных технологий на глобальных рынках привело к созданию систем искусственного интеллекта, а в электроэнергетике — интеллектуальной энергетической системы (ИЭС) с активной, адаптивной электрической сетью на основе технологий SmartGrid. В ведущих индустриальных странах технологии SmartGrid внедрены на уровне государственных целевых электроэнергетических программ развития. Данная технология также

активно начала внедряться и в Российской Федерации. Элементы SmartGrid разделяются на следующие группы:

1) устройства для регулирования (компенсации) реактивной мощности и напряжения, подключённые к сетям параллельно;

2) устройства для регулирования параметров сети (сопротивления сети), включённые последовательно в сеть;

3) устройства ограничения тока короткого замыкания;

4) устройства накопления электрической энергии;

5) вставки постоянного тока и силовые передачи;

6) линии постоянного и переменного тока с использованием новых композитных материалов и высокотемпературных сверхпроводников.

В данном перечне первые три группы устройств относятся к технологии управляемых систем питания переменного тока — гибких систем передачи переменного тока (FACTS) [1, 3]. Элементы данной системы также входят и в другие группы.

FACTS-технологии. Рассмотрим общие принципы и структурные элементы функционирования системы FACTS и возможности использования её устройств в энергосистеме Республики Башкортостан.

В общем виде FACTS является подсистемой SmartGrid, как электрооборудование для «гибких» линий. Внедрение данного оборудования позволяет увеличивать пропускную способность линий электропередач благодаря высокой скорости силовой электроники, влиять на процессы в энергосистемах в режиме on-line, тем самым превращая линии электропередач из пассивных средств передачи электроэнергии в активные устройства управления. В свою очередь устройства FACTS разделяются на следующие группы:

1) статические преобразователи для передачи электроэнергии переменного тока (статические компенсаторы, управляемые реакторы, конденсаторные батареи с тиристорным и механическим переключением);

2) вставки постоянного тока и его силовые передачи;

3) электромашинные комплексы (электрические машины и трансформаторы переменного тока, устройства силовой электроники).

Использование устройств FACTS уменьшает потоки реактивной мощности в сети, что позволяет снизить потери активной энергии и напряжения, регулировать напряжение в энергосистеме и уменьшить нагрузку на линии электропередачи и трансформаторы. В свою очередь, устройства компенсации реактивной мощности включают в себя аккумуляторные батареи (БСК), шунтирующие реакторы, фильтры высоких гармоник, статические тиристорные компенсаторы (СТК) и др.

Рассмотрим более подробно устройства FACTS. *Управляемые электрически шунтирующие реакторы (УШР)* — устройства, предназначенные для компенсации реактивной мощности и стабилизации уровня напряжения в высоковольтных электрических сетях напряжением 35...750 кВ и более, статически шунтирующие устройства с плавно регулируемым индуктивным сопротивлением (поэтому может быть обеспечена любая желаемая скорость изменения мощности реактора). Полевые испытания показали, что практическое использование УШР оптимально при балансе между скоростью реактора и мощностью системы смещения: скорость набора/сброса мощности за 0,3...1,0 с, мощность системы намагничивания — 1...2 % от номинальной мощности реактора. Они предназначены для автоматического управления потоками реактивной мощности и стабилизации уровней напряжения, что в процессе эксплуатации позволяет:

1) устранить дневные и сезонные колебания напряжения в электрической сети;

2) улучшить качество электрической энергии;

3) оптимизировать и автоматизировать режимы работы электрической сети;

4) уменьшить потери электроэнергии при её транспортировке и распределении;

5) улучшить стабильность энергосистемы.

Возможности УШР обеспечивают целесообразность их применения при различных классах напряжения в сети. Поэтому оптимальный эффект может проявиться как на уровне локальных потребительских сетей, так и при решении приоритетных задач национальной энергосистемы в целом по стране. На локальных и глобальных конкурентных рынках энергосистем в электроэнергетике при увеличении инвестиций в развитие электрических сетей, УШР обеспечивают ряд существенных преимуществ для всех хозяйствующих субъектов: на уровне магистральных и распределительных электрических сетей — значительное снижение потери электроэнергии и соответствующее увеличение прибыли системных операторов и распределительных компаний; на уровне потребителей электроэнергии — снижение платы за потребляемую реактивную мощность, поддержание $\cos\varphi$, требуемое качество напряжения у конечных потребителей, а также необходимые меры для подключения новых мощностей к сети [4].

Преобразователь напряжения на управляемых силовых тиристорах (или транзисторах) относится к статистическим компенсаторам (СТАТКОМ), подключён через телесигнализацию (ТС) параллельно линии в узле сети, к которому подключена линия телесигнализации электропередачи. По своей сути принцип работы СТАТКОМ идентичен источникам бесперебойного питания: синусоидальное напряжение с частотой (50 ± 3) Гц формируется из напряжения источника постоянного тока за счёт широтно-импульсной модуляции и использования фильтра гармоник электро-сигналов. Важным и основным свойством СТАТКОМ является способность параллельно генерировать ток любой фазы относительно сетевого напряжения. В итоге мощность, передаваемая по линии переменного тока, зависит только от напряжения на концах линии, фазового угла между ними и полного реактивного сопротивления линии сети. Данная система контролирует мощность линии, стабилизируя напряжение на её концах, поскольку напряжение в узлах сложной сети может изменяться,

а в некоторых режимах, особенно после аварии, может достигать критически низких значений. Кроме того, данная система изменяет сдвиг фаз между напряжениями на концах линии и общее реактивное сопротивление линии сети. Поэтому применение СТАТКОМ позволяет в общих условиях: отказаться от установки дополнительных конденсаторных батарей, которые могут потребоваться при установке, в том числе для фильтрации гармоник; обеспечить удовлетворительное качество электроэнергии, снизить мощность подключённого конденсатора к шинам переменного тока и уменьшить скачки напряжения при переходных процессах; избежать воздействия на сеть переменного тока из-за отсутствия коммутации конденсаторных батарей; уменьшить необходимую площадь, необходимую для дополнительных источников реактивной мощности в сети. Возможность внедрения технологий СТАТКОМ позволит достичь следующих результатов: содействие развитию системных сервисов, возможность гибкого контроля напряжения со стороны системного оператора; возможность среднего увеличения минимального напряжения на 6 % и установившегося напряжения на 2 % на подстанциях 220 кВ; снижение потерь в линиях электропередачи на 5 % [3].

Фазоповоротное устройство (ФПУ) позволяет создать дополнительный фазовый сдвиг между напряжением первичных и вторичных шин в цепи, что обеспечивает контроль потока активной и реактивной энергии. Они могут использоваться для ограничения перегрузки сетей с низким напряжением питания, снижение потери электроэнергии и мощности в электрических сетях, повышение динамической устойчивости электрической системы при больших возмущениях, распределения электроэнергии и расширения возможного диапазона выдачи мощности в нормальных режимах работы сети. Динамический регулируемый сдвиг фазы, вводимый ФПУ, осуществляется посредством повышения напряжения между входом и выходом ФПУ на месте установки устройства. Поэтому чем больше фазовый сдвиг, тем больше будет величина вольтодобавочного напряжения на выходе. В электроэнергетике и электротехнике такое напряжение называется возбуждающим. Оно является независимым, если находится под напряжением на входе ФПУ устройства. Итоговое напряжение зависит от начального напряжения, если оно формируется на входе и возникает в ФПУ. Например, существует несколько способов

подачи вольтодобавочного напряжения: поперечное управление, продольное поперечное управление и симметричное управление. При поперечном («квадратурном») регулировании ФПУ вводится повышающее напряжение, смещённое на ± 90 эл. град. относительно входного напряжения ФПУ, что является возбуждающим напряжением. В этом случае выходное напряжение ФПУ увеличивается по амплитуде и изменяется по фазе. Причём амплитуда будет тем больше, чем на больший угол сдвига будет производиться регулирование. Регулирование может осуществляться при малых углах регулирования (не более 20 эл. град.) [1, 2]. При продольно-поперечном регулировании ФПУ вводит вольтодобавочное напряжение: продольное и поперечное. Продольная составляющая смещена относительно входного напряжения на 180 эл. град., поперечная — на ± 90 эл. град. Изменением амплитуды напряжения можно управлять — оно может быть как большим, так и меньшим. При малых углах регулирования (не более 20 эл. град.) можно использовать только поперечный компонент, а при больших углах (более 20 эл. град.) — продольный [2]. При симметричном регулировании ФПУ вводит смещение напряжения усилителя на ± 90 эл. град. относительно возбуждающего напряжения ФПУ. В этом случае выходное напряжение ФПУ изменяется только по фазе и не изменяется по амплитуде, а регулирование может применяться под любыми углами регулирования [2].

Вставка постоянного тока (ВПТ) выполняет функции межсистемных связей и регуляторных звеньев в энергосистемах. Использование технологии передачи постоянного тока обеспечивает несинхронную связь между энергосистемами в тех случаях, когда их реализация на переменном токе невозможна. Через ВПТ можно объединять энергосистемы, работающие с различной номинальной частотой, одной номинальной частоты, но разных нефиксированных фазовых сдвигов, различных частот и фаз. В случае несинхронного подключения можно выбрать рабочую частоту генераторов и оптимальное количество оборотов в минуту. Поэтому она актуальна для объектов малой генерации (дизельные электростанции, газопоршневые электростанции, паротурбинные электростанции, мини-гидроэлектростанции, геотермальные электростанции, ветряные электростанции, солнечные электростанции и т. д.), имеющих возможность передавать электроэнергию в общую сеть. В классическом

случае такое соединение требует систем синхронизации и сравнительных характеристик, а также больших массогабаритных характеристик и значительной стоимости. Использование ВПТ на основе двунаправленных преобразователей (инверторов) позволяет передавать активную мощность в двух направлениях, а также регулировать реактивную мощность без использования дополнительных источников реактивной энергии сети.

Приложения FACTS-технологий. В настоящее время одной из основных проблем электроэнергетики является создание управляемых реакторов в системе электроснабжения в нашей стране и в мире. Данная задача является актуальной, так как нагрузка на энергосистему страны увеличивается с каждым годом, что приводит к изменению напряжения и потерь в электрической сети, снижению соответственно устойчивости системы, возникновению потребности повышения пропускной способности воздушных линий. С одной стороны, она связана с необходимостью обеспечить условия для работы генераторов электростанций в таком диапазоне генерации реактивной мощности, которая способствовала бы созданию наиболее благоприятных эксплуатационных режимов их работы и повышению качества электрической энергии. С другой стороны — с необходимостью оптимизировать и автоматизировать режимы работы электрической сети, в том числе с использованием в качестве центрального регулятора системы SCADA/EMS, в десятки раз улучшающей условия эксплуатации и повышающей надёжность работы электротехнического оборудования за счёт резкого сокращения числа коммутаций нерегулируемых устройств, компенсации реактивной мощности и ограничения использования менее надёжных в эксплуатации устройств регуляторов под нагрузкой (РПН) трансформаторов и автотрансформаторов. Решение данных технологических проблем позволило бы избежать эффекта «лавины напряжения» при возникновении аварийных ситуаций в электрической сети (например, аварийное отключение нагрузки, генератора, линии электропередачи).

Указанные технологические проблемы можно решить путём применения спирального шунтирующего управляемого реактора. Создана его математическая модель с решением и экспериментально проверены результаты теоретического исследования.

Спиральный управляемый шунтирующий реактор (СУШР) представляет собой статиче-

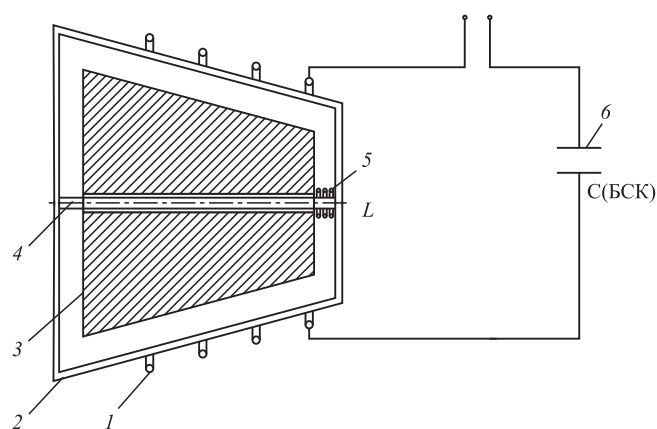


Рис. 1. Спиральный управляемый шунтирующий реактор

ское устройство шунтирующего типа с плавно регулируемым индуктивным сопротивлением. СУШР предназначен для автоматического управления потоками реактивной мощности и стабилизации уровней напряжения [1, 2] в электрической сети, что позволяет решать поставленные задачи в энергетике на мировом уровне.

Исходный СШУР (рис. 1) состоит из спиральной изолированной электропроводящей пружины 1, вставленной в металлический лайнер 2 в виде конической трубки. Внутри находится магнитопровод инерционной массы 3, имеющий возможность перемещаться внутри лайнера по оси 4. Магнитопровод подкреплён пружиной 5, работающей на сжатие и с ограничением на перемещение движения конического магнитопровода (ферромагнитный инерционный элемент). В электрическую цепь воздушной линии последовательно подключается блок статических конденсаторов С (БСК) 6. Пружина подключена к управляемому источнику постоянного тока $U_{упр}$.

Принцип действия предлагаемого СУШР основан на явлении резонанса между спиральным реактором L и блоком статических конденсаторов C . Источник постоянного тока втягивает и растягивает пружину, тем самым инерционный элемент 3 будет двигаться вдоль лайнера, изменяя индуктивность СУШР. Система настраивается на резонанс в линии, обеспечивая переток реактивной мощности и тем самым повышая $\cos \varphi$ сети.

Научная значимость работы заключается в том, что конструкторское решение и теоретические выкладки с экспериментальным сопровождением позволяют решать вопросы электроснабжения с программным управлением существующих энергетических проблем и автоматизацией практически всех процессов на подстанциях и электростанциях.

При разработке приведённой в статье математической модели были использованы ранние работы авторов [3, 5] по спиральным электромеханическим преобразователям.

В ходе теоретических исследований, решения поставленной задачи и анализа полученных результатов использованы методы теории электрических цепей, магнитного поля, методы математического анализа и теория электрических колебательных процессов (биения, индукция и т. д.) в связанных контурах [6, 8].

Колебательные процессы, протекающие в отдельных частях сложных систем, как правило, взаимосвязаны. Поэтому представляет интерес генерация колебательных процессов в этих энергетических системах. Рассматривается колебательный процесс в двух электрических контурах со слабой ёмкостной связью C ($C \ll C_{12}$) и индуктивностями L (рис. 2). Аналогом этого процесса является колебательный процесс в механической системе, состоящей из двух математических маятников одинаковой длины, связанных пружиной с небольшим коэффициентом жёсткости [4].

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для 1-го и 2-го электрических контуров справедливы соотношения [9]

$$L \frac{dI_1}{dt} + \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0; \quad (1)$$

$$L \frac{dI_2}{dt} + \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0. \quad (2)$$

Поскольку $I_1 = \frac{dQ_1}{dt}$ и $I_2 = \frac{dQ_2}{dt}$, уравнения (1) и (2) можно представить в виде

$$L \frac{d^2Q_1}{dt^2} = -\frac{Q_1}{C} + \frac{Q_2 - Q_1}{C_{12}}; \quad (3)$$

$$L \frac{d^2Q_2}{dt^2} = -\frac{Q_1}{C} + \frac{Q_2 - Q_1}{C_{12}}. \quad (4)$$

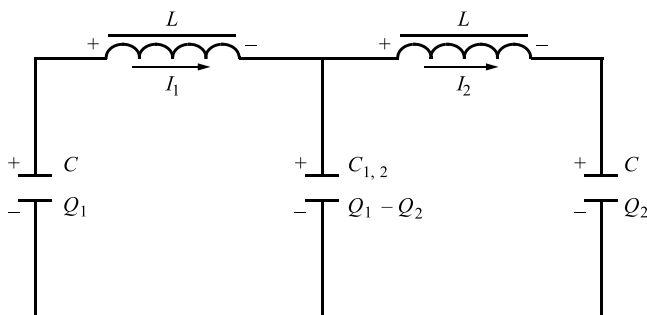


Рис. 2. Схема замещения СШУР, состоящего из двух контуров: 1-го (в левой части рисунка) и 2-го (в правой)

После преобразования [9] уравнения (3) и (4) приобретают вид

$$L \frac{d^2(Q_1 + Q_2)}{dt^2} = -\frac{Q_1 + Q_2}{C_{12}}; \quad (5)$$

$$L \frac{d^2(Q_1 - Q_2)}{dt^2} = -\left(\frac{1}{C} + \frac{2}{C_{12}}\right)(Q_1 - Q_2). \quad (6)$$

Результатом решения уравнений (5) и (6) являются выражения [10]

$$Q_1 + Q_2 = (Q_{10} + Q_{20}) \cos \omega^+ t \quad (7)$$

и

$$Q_1 - Q_2 = (Q_{10} - Q_{20}) \cos \omega^- t, \quad (8)$$

где Q_{10} и Q_{20} — заряды для $t = 0$ на ёмкостях 1-го и 2-го контуров соответственно.

Частота $\omega^+ = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ соответствует частоте свободных электрических колебаний в контуре, состоящем из ёмкости C и индуктивности L , причём $\omega^+ = \sqrt{\frac{1}{LC}} < \omega^- = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_{12}} \right)}$.

Произвольный колебательный процесс в двух электрических контурах со слабой ёмкостной связью можно рассматривать как суперпозицию двух нормальных мод колебаний. Данное утверждение может быть рассмотрено для момента времени $t = 0$, когда заряд на ёмкости C во 2-м контуре равен нулю, т. е. $Q_{20} = 0$. Тогда колебания зарядов Q_1 и Q_2 на ёмкости C в 1-м и 2-м контурах, являющиеся нормальными модами колебаний, описываются уравнениями

$$Q_1 = \frac{1}{2} Q_{10} (\cos \omega^+ t + \cos \omega^- t); \quad (9)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} Q_{10} (\cos \omega^+ t - \cos \omega^- t). \quad (10)$$

Преобразования правых частей уравнений (9) и (10) с помощью известных тригонометрических соотношений позволяют получить выражения

$$Q_1 = Q_{10} \left[\cos \frac{1}{2} (\omega^+ - \omega^-) t \right] \cos \frac{1}{2} (\omega^+ + \omega^-) t; \quad (11)$$

$$Q_2 = Q_{10} \left[\sin \frac{1}{2} (\omega^+ - \omega^-) t \right] \sin \frac{1}{2} (\omega^+ + \omega^-) t, \quad (12)$$

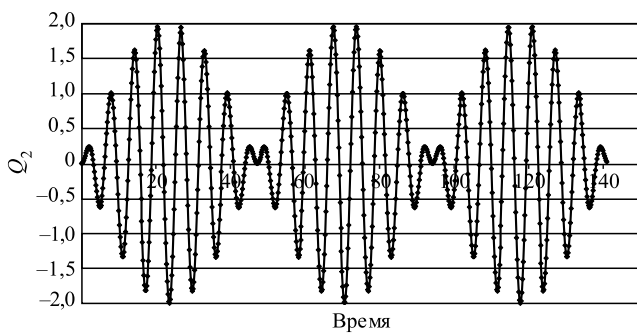


Рис. 3. Осциллограмма работы СШУР

описывающие периодические колебательные процессы, протекающие с угловой частотой $\omega = \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)$ и быстро меняющейся во времени амплитудой, известные как биения [9].

В рассматриваемом случае в силу того, что в начальный момент времени $t = 0$ ёмкость C в 2-м контуре незаряжена, синфазные и антифазные колебания происходят со сдвигом по фазе, равным $\frac{\pi}{2}$. Вследствие этого в тот момент, когда заряд на ёмкости C в 1-м контуре равен нулю, соответствующий заряд на ёмкости C во 2-м контуре максимален, и наоборот (рис. 3).

Поскольку описанная математическая модель применима в случае слабой ёмкостной связи между электрическими контурами, то с учётом неравенства $\frac{C}{C_{12}} \ll 1$ можно записать следующее выражение для частоты обменного процесса [10]:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{обм}} &= \sqrt{\frac{1}{LC}} - \sqrt{\frac{1}{L\left(\frac{1}{C} + \frac{2}{LC_{12}}\right)}} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \left(1 - \sqrt{\frac{1}{L\left(\frac{2LC}{C_{12}}\right)}}\right) = \\ &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{2C}{C_{12}} + \left(\frac{C}{C_{12}}\right)^2}\right) = \\ &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \frac{C}{C_{12}} = \frac{C}{C_{12}} \omega. \end{aligned}$$

Из последнего уравнения следует, что между частотой обменного процесса, т. е. угловой частотой биения в системе, состоящей из двух электрических контуров, связанных слабой ёмкостной связью, и угловой частотой свободных колебаний в контуре, состоящем из ёмкости C и индуктивности L , существует простая связь. Таким образом, изменяя величины L ,

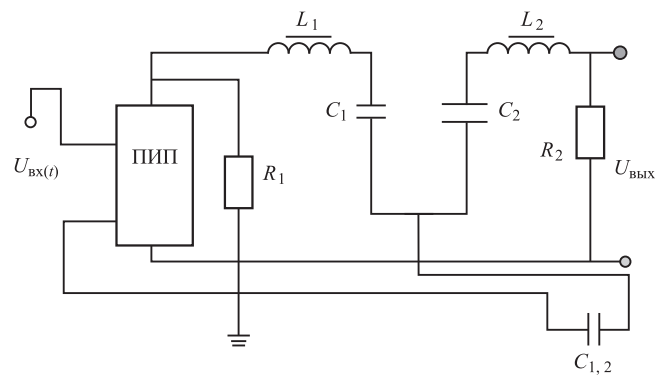


Рис. 4. Электрическая схема подключения генераторов СШУР

C и C_{12} между двумя электрическими контурами, связанными слабой ёмкостной связью, можно добиться максимального значения частоты биений $\omega_{\text{обм}} = \omega$, что является важной практической задачей в энергетике, электро-механике и т. д. [11—13].

Схема подключения генераторов СШУР приведена на рис. 4.

Практическая значимость работы заключается в том, что впервые разработана оригинальная конструкция СШУР, предложена её математическая модель с решением и экспериментальным сопровождением, предлагается использование исходной конструкции в электроэнергетике и других областях науки и техники.

Экспериментальная часть. На рис. 5 приведены огибающие (сплошные линии) экспериментальных осциллограмм производных тока для варианта исполнения спирального магнитокумулятивного генератора СШУР, работающего на ёмкостную нагрузку [14—16]. Производная тока выбрана как величина, характеризующая процессы в генераторе и более часто измеряемая в подобных экспериментах. Производные тока от времени представлены на рис. 5 в безразмерном виде [17—20].

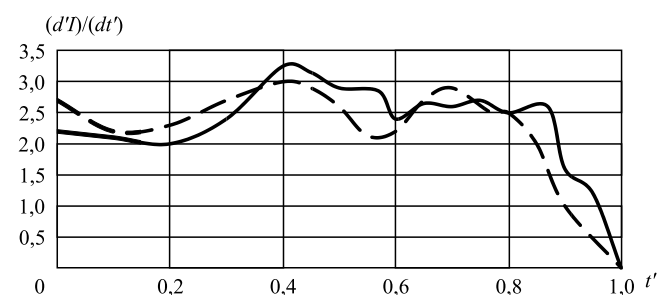


Рис. 5. Зависимость амплитуды производной тока от времени для генератора первого и второго вариантов: — — теоретическая; --- — экспериментальная

Предлагается использовать исходную конструкцию в решении следующих энергетических проблем:

оптимизировать и автоматизировать режимы работы электрической сети, в том числе с использованием в качестве центрального регулятора системы SCADA/EMS;

обеспечить условия для работы генераторов электростанций в таком диапазоне генерации реактивной мощности, который способствует созданию наиболее благоприятных эксплуатационных режимов. После лабораторных испытаний данной электроустановки её можно внедрить в эксплуатацию в отечественной энергосистеме.

Заключение. Применение технологий FACTS может стать основой для создания сетей нового поколения — интеллектуальных энергетических систем. Внедрение данной технологии увеличит эффективность систем электроэнергетики и приведёт к экономии энергоресурсов. Кроме того, она создаст платформу для развития распределённой генерации как на основе традиционных генерирующих станций, так и на базе альтернативной энергетики. Разработана оригинальная конструкция магнитокумулятивного генератора СШУР [18] для электроэнергетики с возможностью его регулирования. Создана математическая модель данной конструкции, позволяющая на основе принципиально новых концептуальных подходов вывести аналитические зависимости, в соответствии с которыми, корректируя определённые параметры генератора СШУР, можно получить максимальные значения частот биений $\omega_{\text{обм}} = \omega$ [19, 20].

Библиографические ссылки

1. Семёнов В.А. Технология Smartgrid и будущее мировой электроэнергетики // *Электрик*. 2013. № 12. С. 17—23.
2. Рожкова Л.Д. Электрооборудование станции и подстанции. М.: Энергия, 1984. 648 с.
3. Фокин Ю.А. Надёжность и эффективность сетей электрических систем. М.: Высшая школа, 1989. 151 с.
4. Янгиров И.Ф. Датчик перемещений и ускорений // *Изобретатели машиностроению*. 2002. № 1. С. 1—12.
5. Каланов Х.Х. Статическое устройство шунтирующего типа / Каланов Х.Х., Носкова А.В., Янгиров И.Ф. // *Использование современных технологий на производстве и в образовательной системе: матер. Всерос. заочной науч.-практ. конф. аспирантов, соискателей и молодых ученых / под общ. ред. Р.Р. Канифова*. Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2016. С. 30—38.
6. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Каланов Х.Х. Электропривод пружинный для борьбы с гололедом воздушных линий // *Вестник ЮУрГУ «Энергетика»*. 2017. Т. 17. № 2. С. 29—33.
7. Вольдек А.И. Индукционные магнетогидродинамические машины. Л.: Энергия, 1970. 324 с.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников / под ред. И.Г. Арамановича. М.: Наука, 1984. 831 с.
9. Попов В.П. Основы теорий цепей. М.: Высшая школа, 1985. 495 с.
10. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1978. 528 с.
11. Буль Б.К., Буль О.Б. и др. Электромеханические аппараты автоматики. М.: Высшая школа, 1988. 303 с.
12. Янгиров И.Ф., Зиялtdинова Л.Ф. Спиральный управляемый шунтирующий реактор (СШУР) / 2-я Всерос. НПК «Современные проблемы электроэнергетики». Махачкала, 2014. С. 16—18.
13. Янгиров И.Ф., Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В. Спиральный накопитель энергии / *Всерос. науч.-практ. конф., посвященная 110-летию А.М. Бадамса «Электротехнические комплексы и системы»*. Уфа: УГАТУ, 2015. С. 208—212.
14. Янгиров И.Ф., Зиялtdинова Л.Ф. Взрывомагнитный генератор спиральный для СВЧ-излучения в машиностроении / III Междунар. заочная конф. «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве. Орск, 2014. С. 64—69.
15. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Электромеханический преобразователь со спиральной вторичной системой // *Электротехника*. 1997. № 4. С. 40—43.
16. Третьяков Д.В. Влияние изоляции проводов спирального магнитокумулятивного генератора на его функционирование // *Электричество*. 2001. № 6. С. 49—55.
17. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом // *Электротехника*. 1994. № 9. С. 12—14.
18. Янгиров И.Ф. Двухспиральный магнитокумулятивный генератор с улучшенными характеристиками / XII Междунар. науч.-практ. конф. «Современное состояние естественных и технических наук». М.: Спутник+, 2013. С. 68—69.
19. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Волкова Т.А. Электромагнитный магнитокумулятивный генератор // Патент России на полезную модель 201511270507. МПК H02 N11/00/. Публ. 22.04.2015. Бюл. № 33.
20. Янгиров И.Ф. Определение собственной частоты колебаний спиральной пружины электромеханических преобразователей // *Электротехника*. 2002. № 1. С. 48—51.

Ссылка для цитирования

Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А. Возможности использования технологий FACTS в энергосистеме и её приложения // *Автоматизация. Современные технологии*. 2021. Т. 75. № 10. С. 435—441.

УДК 681.525

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-10-442-450

А.И. Гаврилов, канд. техн. наук, доц., **М.Ч. До, Н.Л. Тун**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
dominhtrieuvhp@gmail.com

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ

Детально рассмотрены лазерные датчики с различными технологиями, используемыми для отслеживания сварных швов при проведении сварочных работ. Датчики лазерного зрения обеспечивают полную автоматизацию сварочных робототехнических систем и мониторинг процесса в реальном времени. Обоснован выбор системы управления робототехнической системы с лазерным зрением для роботизированной сварки. На основе анализа преимуществ и недостатков прогнозируется практическое применение лазерных датчиков зрения в процессе автоматической сварки.

Ключевые слова: отслеживание сварного шва; датчик лазерного зрения; роботизированная сварка; распознавание швов; предварительная обработка изображений; структура системы управления.

Laser sensors with various technologies used to track weld seams during welding operations are discussed in detail. Laser vision sensors provide full automation of welding robotic systems and real-time process monitoring. Reasonable selection of the control system for a robotic welding system with laser vision is represented. Based on the analysis of the advantages and disadvantages, the practical application of laser vision sensors in the process of automatic welding is predicted.

Keywords: weld seam tracking; laser vision sensor; robotic welding; seam recognition; pre-processing of images; structure of the control system.

Введение. Широкий диапазон применения промышленных роботов включает обработку материалов для разных производственных приложений, например, для контроля качества сварки и механической обработки. Значительный объём исследовательской работы ведётся в тех областях, где точность роботов является основным фактором (дуговая сварка, резка металла и т. д.) [1–5]. В последнее время, с развитием производственных технологий, роботы стали интеллектуальной, адаптивной и автоматической производственной моделью. Как известно, инновации в области сварки произошли и эволюционировали от ручного труда до высокоразвитой системной специализированной науки. Тестирование и моделирование интеллектуальной деятельности сварщика имеют решающее значение для повышения качества механической сварки. Использование промышленных роботов имеет важное значение в опасных рабочих средах, где доступ человека-оператора не представляется возможным, например, в технологии судостроения, на атомных электростанциях, при техническом обслуживании и ремонте и т. д. Сварочные роботы и их аппаратные компоненты (двигатели, датчики и исполнитель-

ные механизмы) стали более важными для современной сварки, с более высокой производительностью и безопасностью, чем ручная сварка. Роботизированные сварочные фреймворки имеют такие преимущества, как эффективность, качество сварки, адаптируемость и рациональное использование рабочего пространства [6, 7]. В основном сварочные роботы функционируют в режиме «научи и повторяй», так как они недостаточно адаптируемы, особенно во время сварки. Поскольку на сварку как процесс влияют многочисленные факторы (производственные дефекты, ошибки предварительной обработки, подгонки заготовки), которые приводят к изменению сварочного зазора, методы сварки должны быть сбалансированы в соответствии с этапами работы. Роботы в режиме программного управления не обладают возможностями адаптации и обычно сваривают детали с дефектами. Поэтому важно построить фреймворк автоматического управления сварочными роботами, работающими в тренирующем и воспроизводящем режимах [8, 9]. Конструкция для механической сварки обычно должна состоять из трёх наиболее важных частей: датчиков, определяющих состояние процесса сварки; модели

процесса, обеспечивающей взаимосвязь между факторами, влияющими на процесс сварки, и геометрией сварного шва; фреймворка управления, оценивающего информацию датчиков и изменяющего процедурные элементы сварки, используя взаимосвязь в модели процесса [10—12].

В настоящее время использование промышленных роботов в сварочной технике стало популярным [13, 14]. Интеграция робота в процесс сварки имеет следующие преимущества:

оптимизация затрат и качества для малых и средних объёмов производства;

эффективность поддержания качества;

гибкость процесса, а также возможность использования для других современных производственных процессов;

адаптируемость к изменениям объёмов производства на производственной линии.

Роль датчика в процессе сварки. Для перемещения сварочной головки вдоль траектории сварки в традиционных системах сварочных роботов используются различного рода направляющие. Кроме того, программирование параметров сварки, запуск и гашение дуги, управление защитным газом и роботом для плавной сварки должны выполняться одновременно. Но это часто приводит к ошибкам в локализации горелки и неудовлетворительному качеству сварки. Проблемы можно решить посредством использования датчиков для отслеживания сварного шва и контроля сварочной ванны [15]. Спрос на интеллектуальную роботизированную сварочную концепцию растёт в связи с изменениями проектирования и подходом к гибкому производству с использованием САПР. Датчики, интегрированные с приводами роботов, могут существенно улучшить сварочный процесс [16, 17]. Общий автоматический процесс сварки является многоэтапным процессом. У каждого этапа своя роль, но конечной целью является обеспечение качества сварки.

Применение датчиков в производственных процессах приводит к широкой адаптивности к объёмам производства, изменению продукта и жизненного цикла продукта. Датчики про-

изводственного процесса могут использоваться для оптимизации и управления процессами на различных станках. Они также могут использоваться для расширения адаптируемости робота. В основном использование датчиков в сварочных операциях заключается в контроле параметров сварки.

Датчик лазерного зрения для отслеживания сварных швов. Большинство типов датчиков, используемых для создания сварных швов и управления траекторией движения сварочной горелки, основаны на принципе чувствительной дуги или светочувствительности. В промышленности также существуют другие типы датчиков, которые способны определять отдельные характеристики (инфракрасные, акустические, электромагнитные датчики и т. п.). Различные типы датчиков, используемых в процессе сварки для формирования траектории и отслеживания сварного шва, показаны на рис. 1.

Сенсорные технологии, используемые в сварочной технике, делятся на два основных типа: датчики контактного типа и бесконтактные. Из-за опасных условий работы в зоне сварного шва с высокой температурой, брызгами металла во многих направлениях и других вредных факторов обычно используются бесконтактные методы слежения за стыком. В соответствии с развитием науки и техники технология бесконтактных датчиков, применяемая в авто-

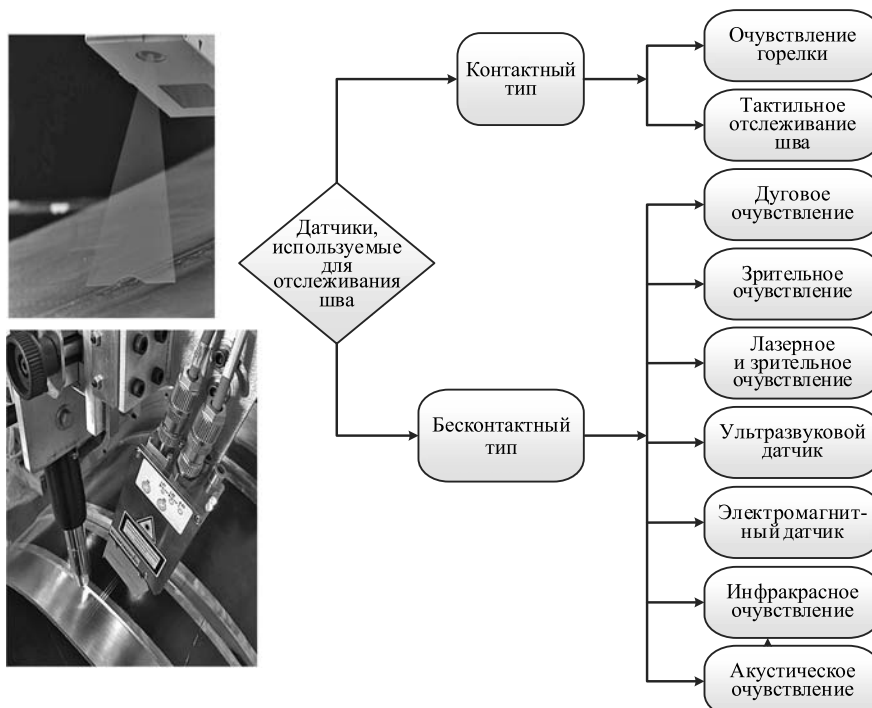


Рис. 1. Типы датчиков, используемых для отслеживания сварного шва

матической сварке, имеет множество различных форм: датчик дуги, датчик технического зрения, датчик лазерного зрения, ультразвуковой датчик, электромагнитный датчик, инфракрасный датчик и датчик звука. Каждый из этих датчиков имеет преимущества и недостатки и используется в различных масштабах и типах производства. Однако в соответствии с требованиями современного промышленного производства, датчики лазерного зрения широко исследуются и применяются для повышения качества сборки деталей в системах промышленного оборудования.

В рамках данной статьи проводится анализ результатов исследований и применения технологий на основе датчиков лазерного зрения в процессе или технологии автоматического отслеживания сварного стыка.

В датчиках технического зрения использование только ПЗС-камеры для отслеживания сварных швов становится очень сложным, поскольку предлагаемые алгоритмы для определения положения сварного шва из плоскости двумерного изображения не слишком точны и требуют больших вычислительных затрат. Кроме того, трудно измерить глубину сварного желобка, ширину и другие геометрические параметры сварного шва. В настоящее время разработаны зрительные датчики со структурированными излучателями света, т. е. лазерные диоды, которые позволяют решить указанные проблемы.

Десятилетия назад проблема отслеживания сварного шва с технологией лазерного зрения была разработана для автомобильной промышленности. В работах [18, 19] описано применение датчиков лазерного зрения в различных отраслях промышленности.

В статье [20] рассмотрены система управления адаптивного сварочного робота, использующая датчик лазерного зрения для подводной сварки, структура датчика подводного лазерного зрения, предназначенная для

определения положения сварного шва в условиях подводной сварки. Базовый процесс отслеживания сварных швов с помощью датчика лазерного зрения представлен на рис. 2.

Структура и принцип действия лазерного датчика зрения. Большинство базовых датчиков лазерного зрения состоят из трёх основных компонентов: диодного лазера, камеры ПЗС и фильтра. Лазерные диоды могут создавать полосу или точку, которую можно сканировать камерой. Камера ПЗС всегда удерживается под углом по отношению к лазерному генератору, чтобы захватить изображение лазера на поверхности заготовки [21]. В работе [22] рассмотрена система отслеживания сварного шва на основе датчика лазерного зрения, включающая трёхходовый лазерный генератор, промышленную камеру ПЗС и оптический фильтр. Система оснащена промышленной ПЗС-камерой, камерой Basler acA1280-60gm с фокусным расстоянием 8 мм и разрешением 1024×1280 . Длина волны лазерного генератора составляет 650 нм. Полосовые фильтры Эдмунда с центральной длиной волны 660 нм и полосой пропускания 10 нм выбраны для уменьшения шума во время сварки.

Принципы выбора датчика лазерного зрения на основе анализа спектра MIG приведены в работе [23]. Датчик лазерного зрения включает в себя лазерный диод мощностью 30 мВт; линейную камеру ПЗС с 1024 пикселями, передающую оцифрованные значения через интерфейс RS-422 с персональным компьютером; фильтр, размещённый перед ПЗС-камерой и не пропускающий большую часть нежелательного дугового света. Колёблющееся зеркало оснащено оптическими энкодерами с частотой настройки в диапазоне 5...20 Гц. Спектральный анализ проводился для сварочных токов 100, 120, 140 и 160 А (при сварочных напряжениях 21, 22, 23,5 и 25 В соответственно). Камера ПЗС принимает проекцию лазерного света на заготовку, определяя направление проекции

в сторону оси головки датчика. Можно измерить угол между осью камеры ПЗС и линией от центра объектива до проекционной точки. По этим двум углам измеряется расстояние между центром сканера и лазерной точкой, а также расстояние между объективом камеры и лазерной точкой. На основе этой



Рис. 2. Отслеживание стыка с использованием датчика лазерного зрения

информации с использованием принципа триангуляции можно измерить расстояние от заготовки до головки датчика и выразить его с помощью выражения

$$h = \frac{D_x + D_y \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}, \quad (1)$$

где h — высота, измеренная датчиком лазерного зрения; D_x — расстояние между лазерной точкой и центром сканера; D_y — расстояние между осью лазерной точки до оси камеры ПЗС; θ_1 — угол подсветки лазера; θ_2 — угол направления лазерного света на сенсорную головку.

На основе сравнения спектров сварочной дуги сделан вывод о том, что оптимальные диоды, выбранные для датчиков дуговой сварки, должны иметь центральную длину волны 467, 594, 610, 632 и 950 нм. Датчик [24] может извлекать трёхмерные профили поверхности сварного стыка по принципу триангуляции. Используется однолинейный лазер с длиной волны 685 нм, мощностью 30 мВт, КМОП-камера с частотой 30 кадров/с для захвата лазерных лучей, отражённых от поверхности сварного стыка.

Получение и обработка изображений. Этот шаг предпринимается для сбора и предварительной обработки изображений, отображаемых с поверхности сварного шва на камеру ПЗС. Для решения этой проблемы используется множество различных методов. Однако в большинстве исследований применялся метод фильтрации шума изображения и пороговой сегментации [25]. В работе [26] предложен метод предварительной обработки изображения для системы датчика лазерного зрения в процессе многослойной сварки. Система включает усредняющий фильтр для удаления шума, пороговую сегментацию с помощью алгоритма единого порога для извлечения точки интереса, шумоподавление для устранения рассеяния, прореживание для извлечения центральной линии из двоичного изображения и, наконец, получение полного профиля (лазерной кривой) на фоне изображения.

В работах [27, 28] используются различные методы фильтрации, чтобы найти оптимальную технику фильтрации, которая устраняет шум при обработке изображений при дуговой сварке. Для сравнения были применены три метода фильтрации: по Гауссу, Винеру и медианная. Для проверки эффективности используются четыре статистических алгоритма: MSE (среднеквадратическая ошибка),

RMSE (среднеквадратичная ошибка), PSNR (пиковое отношение сигнала к шуму) и SNR (отношение сигнал/шум). Из статистического сравнения установлено, что значения MSE и RMSE для медианного фильтра были минимальными, а значения PSNR и SNR для этого фильтра — максимальными. Это означает, что медианный фильтр является наиболее эффективным методом устранения шумов.

Метод предварительной обработки изображения для увеличения контрастности исходного изображения сварного шва с помощью алгоритма расширения тёмной границы на изображении реализуется в соответствии с выражением [29]

$$\begin{aligned} g(x, y) &= kf(x, y) - m; \\ k &= [g(x, y)_{\max} - g(x, y)_{\min}] / [f(x, y)_{\max} - f(x, y)_{\min}]; \\ m &= kf(x, y)_{\min}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $f(x, y)$ — значение яркости пикселя в исходном изображении; $g(x, y)$ — значение яркости пикселя в преобразованном изображении; k и m — две константы; $f(x, y)_{\max}$, $f(x, y)_{\min}$ — максимальное и минимальное значения яркости пикселя до усиления; $g(x, y)_{\max}$, $g(x, y)_{\min}$ — максимальное и минимальное значения яркости пикселя после усиления.

Затем используется медианный фильтр, чтобы отфильтровать шум ненужных пикселей, вызванный лучами электрической дуги, пылью и т. д. Чтобы получить изображение, содержащее чёткие сварные швы, из исходного изображения используется метод бинаризации. Принцип этого метода состоит в том, чтобы преобразовать исходное изображение в двоичное на основе значения разделённой темноты T , которое получается методом статистического распределения ($T \approx 255$).

В работе [30] предложен метод предварительной обработки исходного изображения сварного шва с помощью нескольких усредняющих фильтров, преобразования цветового пространства RGB в HSV для извлечения красной лазерной полосы на изображении, медианного фильтра для фильтрации белого шума и длинных следов на изображении.

В статье [31] проведён анализ метода центра тяжести (COG). Сначала определяются координаты центра по значениям координат изображения по горизонтали и вертикали и интенсивности пикселей. Затем выполняется пороговая обработка, чтобы отфильтровать шум в области датчика. Метод среднего окна

применяется для решения проблем, связанных с неровностями центральной линии с разными пикселями между последовательными координатами в горизонтальном направлении.

В работе [32] описана обработка изображения в четыре этапа, включая предварительную обработку изображения, вычисление области и порога, прореживание и извлечение характеристик профиля стыка. По проецированию значений яркости полутонового изображения на вертикальную и горизонтальную оси можно определить интересующую область (ROI). Затем, чтобы сегментировать сварной шов, вычисляются адаптивные пороговые значения для лазерной полосы. Для получения параметров разделки стыка и лазерной полосы применён алгоритм быстрого параллельного прореживания. Затем характерные линии были извлечены с помощью преобразования Хафа. Для получения характерных линий с большой точностью используется аппроксимация линии методом наименьших квадратов. Первый этап предварительной обработки изображения — сегментация изображения и следующий этап — улучшение изображения, на котором целевая область была разделена на две подобласти [33]. Выбор подходящего порога был сделан в соответствии с частотным распределением уровня серого в подобластях. Затем преобразование Хафа было использовано для обнаружения точной линии лазерной полосы.

В работах [34, 35] рассмотрены алгоритмы предварительной обработки изображений для лазерного трёхлинейного датчика зрения. Медианный фильтр использовался для уменьшения или устранения шумов из-за дугового света, отражения и рассеяния. Затем для усиления лазерных полос использовалась специальная маска. Преобразования прореживания были применены для более чёткой визуализации лазерных линий. Наконец, корректирующие действия выполняются для более точного определения расположения сварных швов.

Методы получения информации об интенсивности, направлении, а также отслеживания сварного шва исследованы в работах [36, 37]. Для получения информации о направлении лазерной полосы применялись фильтры Габора. Однако эти фильтры используются только с заданным углом, поэтому часть конфигурации сварного шва не обнаруживается. Для решения этой проблемы используется секционированный фильтр Габора. Результат этого можно назвать картой характеристики ориентации. Затем метрика измерения рассчитывается с исполь-

зованием алгоритма пороговой сегментации и кластеризации с помощью правила ближайшего соседа на основе евклидова расстояния. Также можно легко обнаружить объекты с более высокой интенсивностью (расплавленная ванна и яркий свет дуги). Поскольку интенсивность лазерной полосы не поддерживает её однородность, неоднородность также можно использовать для увеличения её заметности. Фильтр Гаусса и медианный фильтр [38] используются для удаления компоненты высокочастотных и случайных шумов на изображении. Результаты экспериментов показывают, что применение медианного фильтра может дать лучшие результаты. Затем применяются морфологические фильтры эрозии и расширения для устранения других типов шума и усиления проецирования лазерного света. Результаты обработки с помощью гауссовской фильтрации приведены на рис. 3.

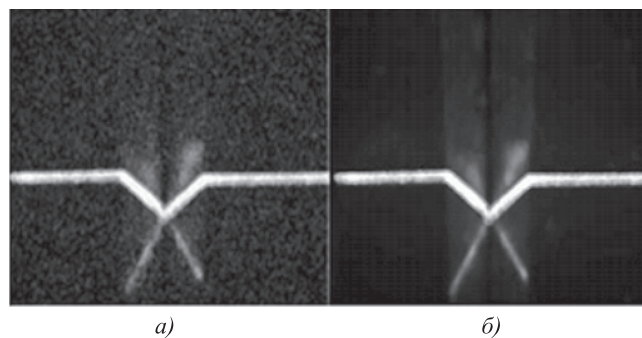


Рис. 3. Результаты обработки изображения с помощью: а — гауссовой фильтрации; б — медианной фильтрации

Случаи изображений сварных швов, содержащих сильные шумовые компоненты, исследованы в работах [39—41].

Конструкция контроллера. В современной автоматической сварочной технике важную роль играют проектирование и программирование контроллера. Контроллер получает информацию от датчиков извлечения профиля сварного шва, параметров процесса автоматической сварки (ток, напряжение, скорость подачи сварочного электрода, состояние газа, скорость сварки и т. д.) и управляет исполнительными механизмами для поддержания рабочих режимов. Управление траекторией движения сварочного робота и отслеживание положения разделки стыка важны для обеспечения качества сварки в соответствии с установленными стандартами. Характеристики сварного шва, полученные методами обработки изображения, являются данными обратной связи в контроллере. Одна из перспективных

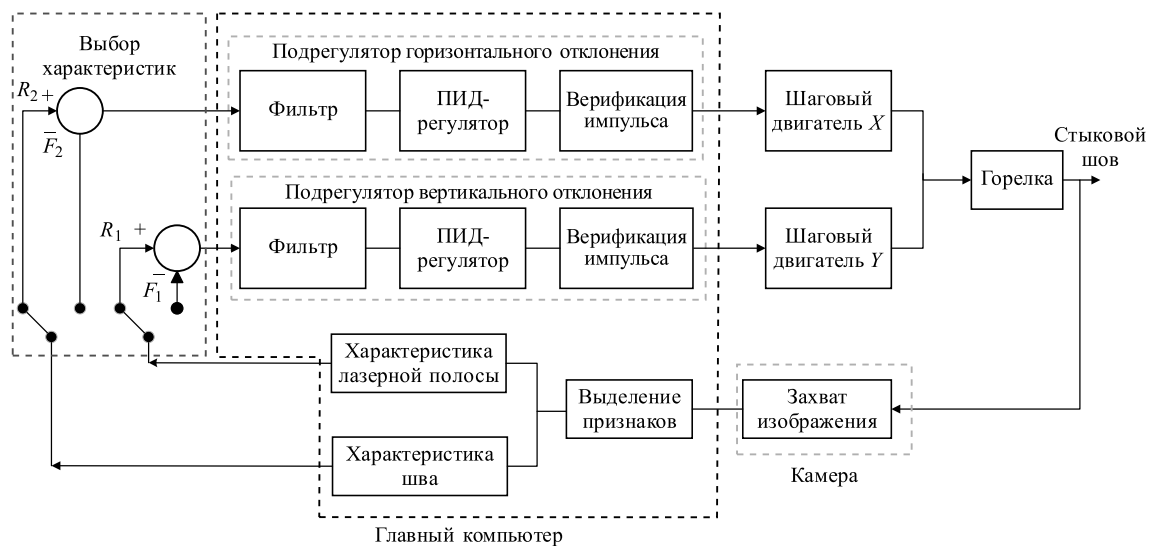


Рис. 4. Структурная схема разработанного модуля управления

структур модуля управления представлена на рис. 4 [42]. Два регулятора использованы для управления отклонением горелки в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Для этого характеристики эталонного изображения рассчитывались до начала процесса сварки при ручной коррекции между положением сварного шва и горелкой. В каждый момент получали изображения обратной связи и характеристики для расчёта отклонения горелки. Фильтрация ошибок по Гауссу выполнялась для исключения быстрых изменений ошибки. Инкрементальный ПИД-регулятор использовался для управления шаговым двигателем.

Задачи управления роботом для отслеживания сварного шва, определение начальной точки и управление сварочной головкой для перемещения в начальную точку перед сварочным процессом исследованы в работах [43—48].

Наиболее перспективной схемой является управление роботом на основе обработки изо-

бражения и определения положения [49]. После вычисления трёхмерных координат характерной точки по изображению компьютер выдаёт результаты параметров движения робота.

Из-за нелинейной взаимосвязи между изменением координат пикселей и механическим смещением осей сварочного робота сложно построить регулятор для управления движением робота в направлениях X и Y . Поэтому используется нейронная сеть для настройки модели зрения, отражающей движение поперечного механизма в соответствии с изменением пяти характерных точек. Отклонение положения пяти характерных пикселей в координате изображения используется как вход нейронной сети, на выходе — импульсы, соответствующие M_x и M_y с изменением координаты пикселя. Выходной сигнал нейронной сети подаётся на два ПИД-регулятора для создания сигналов, управляющих двумя двигателями по двум осям. Схема управления изображена на рис. 5.

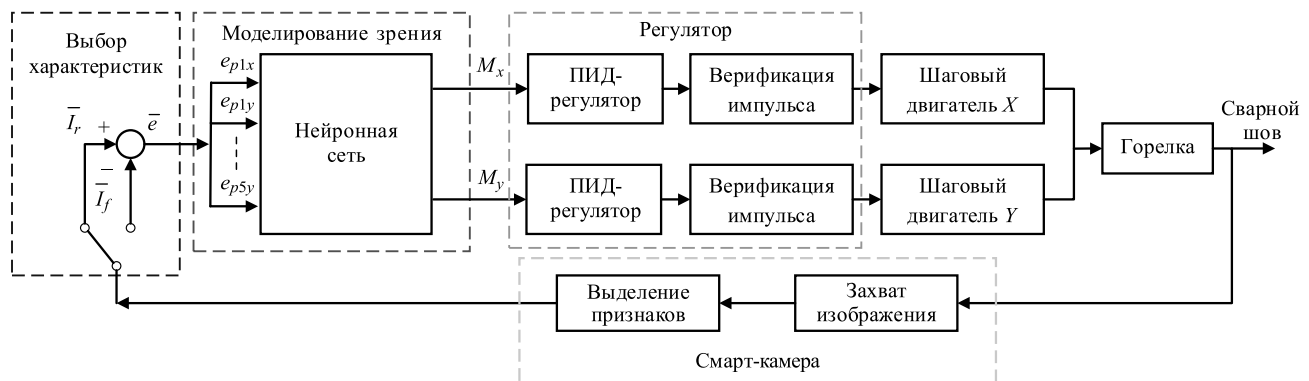


Рис. 5. Конструкция регулятора системы отслеживания сварного шва на основе нейронной сети с обратным распространением [50]

В работе [51] представлен алгоритм сглаживания контура для устранения оптического шума, выравнивания горелки по форме стыка с небольшой ошибкой отслеживания при одновременном управлении скоростью робота в реальном времени. Система управления основана на положении, векторе касательной к траектории и управлении наклоном. Предлагаемая система управления обеспечивает определение следующего положения центральной точки на основе текущего положения центральной точки.

Заключение. Проведён анализ и синтезирована структура системы управления сварочного робота, использующая лазерные датчики зрения для выделения характерных точек разделки стыка, повышающая качество управления роботом для отслеживания линии шва. Анализ экспериментальных результатов ряда работ в области промышленных сварочных роботов показывает, что системы датчиков лазерного зрения имеют следующие преимущества:

метод обработки изображения проще, чем при использовании других типов датчиков, так как его можно непосредственно извлекать из изображения лазерной полосы, отражённой от свариваемой поверхности;

ошибка отслеживания сварного шва меньше, чем при использовании других типов датчиков;

положение сварного шва и геометрические параметры разделки стыка в трёх измерениях получают с небольшим отклонением;

параметры сварки можно контролировать в реальном времени;

возможно применение сварки для различных материалов (сталь, алюминий, титан и т. д.), включая детали большой толщины;

качество сварного шва можно проверить после сварки методом измерения геометрии с помощью датчиков лазерного зрения.

Однако большинство датчиков лазерного зрения имеют высокую стоимость, и их не просто интегрировать в системы сварочных роботов. Исследования показывают, что датчики лазерного зрения в задаче отслеживания сварного шва наиболее часто используются при сварке GMAW.

Методы, используемые многими авторами, включают предварительную обработку изображений, алгоритмы извлечения характерных точек типовых соединений, а также построение контура автоматического отслеживания сварного шва.

Статистика показывает, что параметры сварки и датчиков чаще всего используются

при управлении сварочным технологическим процессом. Параметры сварки обычно включают скорость подачи проволоки, сварочный ток, сварочное напряжение, тип электрода, расстояние от горелки до заготовки, скорость сварки, расход газа, частоту сварки и т. д. Во многих работах наиболее часто используются скорость сварки и сварочный ток. Скорость сварки играет важную роль при разработке контроллера сварочного робота для отслеживания траектории. Используемые спецификации датчика лазерного зрения обычно включают размер изображения, кадровую частоту, область интереса, просматриваемое расстояние, скорость отслеживания шва и т. д.

В схемах управления сварочными роботами используют традиционные ПИД-регуляторы, нечёткие регуляторы или нейронные сети для настройки параметров сварки во время процесса, построения траектории перемещения робота на основе эталонных данных и данных датчиков.

Библиографические ссылки

1. **Chen S., Qiu T., Lin T., Wu Y.** On intelligentized technologies for modern welding manufacturing // *Chin. J. Mech. Eng.* 2003. No. 16 (4). P. 367—370.
2. **Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G.** Robotics modelling, planning and control // Springer. 2009. DOI: 10.1007/978-1-84628-642-1.
3. **Ding D., Shen C., Pan Z., Cuiuri D., Li H., Larkin N., Duin S.V.** Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part // *Computer-Aided Design.* 2016. Vol. 73. P. 66—75. DOI: 10.1016/j.cad.2015.12.003.
4. **Sciavicco L., Siciliano B.** Modelling and Control of Robot Manipulators // *Measurement Science and Technology.* 2000. Vol. 11. No. 12. DOI: 10.1088/0957-0233/11/12/709.
5. **Chen S.B.** On Intelligentized Welding Manufacturing // *Robotic Welding, Intelligence and Automation. RWIA 2014 // Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2015. Vol. 363. DOI: 10.1007/978-3-319-18997-0_1.
6. **Pires J.N., Loureiro A., Böllmsjö G.** Welding Robots Technology, System Issues and Application // Springer International Publishing. 2006. DOI: 10.1007/1-84628-191-1.
7. **Chen S.B., Lv N.** Research evolution on intelligentized technologies for arc welding process // *Journal of Manufacturing Processes.* 2014. Vol. 16. Iss. 1. P. 109—122. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.07.002.
8. **Chen S.B., Wu J.** Intelligentized Technology for Arc Welding Dynamic Process // Springer-Verlag. 2009. Vol. 29. DOI: 10.1007/978-3-540-85642-9.
9. **Xuea K., Wang Z., Shena J., Hua S., Zhena Y., Liua J., Wuc D., Yang H.** Robotic seam tracking system based on vision sensing and human-machine interaction for multi-pass MAG welding // *Journal of Manufacturing Processes.* 2020. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.026.

10. **Yin L., Wang J., Hu H.** Prediction of weld formation in 5083 aluminum alloy by twin-wire CMT welding based on deep learning // *Weld World*. 2019. No. 63. P. 947—955. DOI: 10.1007/s40194-019-00726-z.
11. **Chandrasekaran R.R., Benoit M.J., Barrett J.M.** Multi-variable statistical models for predicting bead geometry in gas metal arc welding // *Int. J. Adv. Manuf Technol.* 2019. No. 105. P. 1573—1584. DOI: 10.1007/s00170-019-04355-0.
12. **Shen W., Hu T., Zhang C., Ye Y., Li Z.** A welding task data model for intelligent process planning of robotic welding // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 64. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.101934.
13. **Baskoro A.S., Erwanto, Winarto.** Monitoring of molten pool image during pipe welding in gas metal arc welding (GMAW) using machine vision // 2011 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems. Jakarta. 2011. P. 381—384.
14. **Lee D., Ku N., Kim T.W., Kim J., Lee K.Y., Son Y.S.** Development and application of an intelligent welding robot system for shipbuilding // *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2011. Vol. 27. Iss. 2. P. 377—388. DOI: 10.1016/j.rcim.2010.08.006.
15. **Kah P., Shrestha M., Hiltunen E., Martikainen J.** Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications // *Int. J. Mech. Mater. Eng.* 10. 2015. Vol. 13. DOI: 10.1186/s40712-015-0042-y.
16. **Suyi L., Lingteng L., Hua Z., Jianjun B., Guorong W.** Study of Robot Seam Tracking System with Laser Vision / 2009 IEEE Int. Conf. Mech. 2009. P. 1296—1301. DOI: 10.1109/ICMA.2009.5246180.
17. **Shi Y.H., Wang G.R., Li G.J.** Adaptive Robotic Welding System Using Laser Vision Sensing for Underwater Engineering // 2007 IEEE Int. Conf. Contr. Auto. China. 2007. P. 1213—1218. DOI: 10.1109/ICCA.2007.4376553.
18. **Zeng J., Cao G.Z., Peng Y.P., Huang S.D.** A Weld Joint Type Identification Method for Visual Sensor Based on Image Features and SVM // *Sensors*. 2020. Vol. 20. Iss. 2. DOI: 10.3390/s20020471.
19. **Zou Y., Wang Y., Zhou W., Chen X.** Real-time seam tracking control system based on line laser visions // *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 103. P. 182—192. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.01.010.
20. **Agapiou G., Kasiouras C., Serafetinides A.** A detailed analysis of the mig spectrum for the development of laser-based seam tracking sensors // *Opt. Laser Technol.* 1999. Vol. 31. Iss. 2. P. 157—161. DOI: 10.1016/S0030-3992(99)00021-3.
21. **Гладков Э.А., Толокнов Ю.О., Демидов П.С.** Профилометрия разделки стыка для решения задач геометрической и технологической адаптации сварочного оборудования при автоматических способах дуговой сварки труб // *Наука и образование. Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2013. DOI: 10.7463/0913.0618953.
22. **Xu P., Xu G., Tang X., Yao S.** A visual seam tracking system for robotic arc welding // *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2008. Vol. 37. P. 70—75. DOI: 10.1007/s00170-007-0939-6.
23. **Idrobo-Pizo G.A., Motta J.M.S.T, Sampaio R.C.** A Calibration Method for a Laser Triangulation Scanner Mounted on a Robot Arm for Surface Mapping // *Sensors (Basel)*. 2019. DOI: 10.3390/s19081783.
24. **Huang Y., Xiao Y., Wang P., Li M.** A seam-tracking laser welding platform with 3d and 2d visual information fusion vision sensor system // *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2013. Vol. 67. P. 415—426. DOI: 10.1007/s00170-012-4494-4.
25. **Li Y., Xu D., Yan Z., Tan M.** Girth seam tracking system based on vision for pipe welding robot // *Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Springer. 2007. P. 391—399.
26. **Xiao Z.** Research on a triline laser vision sensor for seam tracking in welding // *Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Springer. 2011. P. 139—144.
27. **Matsui S., Goktug G.** Slit laser sensor guided real-time seam tracking arc welding robot system for non-uniform joint gaps // 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology. Thailand. 2002. Vol. 1. P. 159—162.
28. **Fridenfalk M., Bolmsjö G.** Design and validation of a universal 6d seam tracking system in robotic welding based on laser scanning // *Ind. Robot.* 2003. Vol. 30. Iss. 5. P. 437—448. DOI: 10.1108/01439910310492202.
29. **Sung K., Lee H., Choi Y., Rhee S.** Development of a multiline laser vision sensor for joint tracking in welding // *Weld. J.* 2009. Vol. 88. Iss. 4. P. 79—85.
30. **Zeng J., Chang B., Du D., Wang L., Chang S., Peng G., Wang W.** A weld position recognition method based on directional and structured light information fusion in multi-layer/multi-pass welding // *Sensors*. 2018. Vol. 18. Iss. 1. DOI: 10.3390/s18010129.
31. **Lu X., Gu D., Wang Y., Qu Y., Qin C., Huang F.** Feature extraction of weld groove image based on laser vision // *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18. Iss. 11. P. 4715—4724.
32. **Gu W., Xiong Z., Wan W.** Autonomous seam acquisition and tracking system for multi-pass welding based on vision sensor // *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2013. Vol. 69. P. 451—460.
33. **Chang D., Son D., Lee J., Lee D., Kim T.-w., Lee K.-Y., Kim J.** A new seam-tracking algorithm through characteristic-point detection for a portable welding robot // *Robot Comput. Integr. Manuf.* 2012. Vol. 28. Iss. 1. P. 1—13.
34. **Wu Q.-Q., Lee J.-P., Park M.-H., Park C.-K., Kim I.-S.** A study on development of optimal noise filter algorithm for laser vision system in GMA welding // *Procedia Eng.* 2014. Vol. 97. P. 819—827.
35. **Muhammad J., Altun H., Abo-Serie E.** A robust butt welding seam finding technique for intelligent robotic welding system using active laser vision // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. DOI: 94. 10.1007/s00170-016-9481-8.
36. **Kim C.-H., Choi T.-Y., Suh J., Park K.-T., Lee J.-J., Kang H.-S., Lee M.-Y., Kim S.-r.** Sensor guided laser welding robot system // *IFAC Proc.* 2008. Vol. 41. Iss. 2. P. 4324—4329.
37. **Fang Z., Xu D., Tan M.** Visual seam tracking system for butt weld of thin plate // *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2010. Vol. 49. Iss. 5. P. 519—526.
38. **Yan Z., Xu D., Li Y., Tan M.** A vision-based seam tracking system for submerged arc welding // *Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Springer. 2007. P. 349—357.
39. **Xiong Z., Wan W., Pan J.** Application of fuzzy edge detection in weld seam tracking system // *Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Springer. 2011. P. 323—330.
40. **He Y., Chen Y., Xu Y., Huang Y., Chen S.** Autonomous detection of weld seam profiles via a model of saliency-based visual attention for robotic arc welding // *J. Intell. Robot. Syst.* 2016. Vol. 81. P. 395—406. DOI: 10.1007/s10846-015-0226-y.

41. He Y., Xu Y., Chen Y., Chen H., Chen S. Weld seam profile detection and feature point extraction for multi-pass route planning based on visual attention model // Robot Comput. Integr. Manuf. 2016. Vol. 37. P. 251—261. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.04.005.
42. Lee J.-P., Wu Q.-Q., Park M.-H., Park C.-K., Kim I.-S. A study on optimal algorithms to find joint tracking in GMA welding // Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol. 2014. Vol. 3. P. 370—380.
43. Huissoon J.P. Robotic laser welding: seam sensor and laser focal frame registration // Robotica. 2002. Vol. 20. Iss. 03. P. 261—268. DOI: 10.1017/S0263574701003988.
44. Du R., Xu Y., Hou Z., Shu J., Chen S. Strong noise image processing for vision-based seam tracking in robotic gas metal arc welding // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019. Vol. 101. P. 2135—2149. DOI: 10.1007/s00170-018-3115-2.
45. Luo H., Chen X. Laser visual sensing for seam tracking in robotic arc welding of titanium alloys // Int. J. Adv. Manufact. Technol. 2005. Vol. 26. Iss. 9. P. 1012—1017.
46. Zhang W., Zheng Z., Ma X., Chen Q., Du D. Circular sub-window multi-step GPI method in seam tracking of welding robot based on 3d vision // Intell. Robot. Appl. 2008. P. 916—926.
47. Xiao R., Xu Y., Hou Z., Chen C., Chen S. An adaptive feature extraction algorithm for multiple typical seam tracking based on vision sensor in robotic arc welding // Sensors and Actuators A: Physical. 2019. Vol. 297. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111533.
48. Wang N., Zhong K., Shi X., Zhang X. A robust weld seam recognition method under heavy noise based on structured-light vision // Robot. Comput. Integr. Manuf. 2020. Vol. 61. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101821.
49. Fan J., Jing F., Yang L., Long T., Tan M. A precise initial weld point guiding method of micro-gap weld based on structured light vision sensor // IEEE Sens. J. 2019. Vol. 19. P. 322—331. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2876144.
50. Fang Z., Xu D. Vision Based Modeling and Control for Fillet Weld Seam Tracking // ICAM. 2010. Vol. 5. P. 557—562. DOI: 10.1299/jsmeicam.2010.5.557.
51. Koch H., Konig A., Kleinmann K., Weigl-Seitz A., Suchy J. Predictive robotic contour following using laser-camera-triangulation // Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). 2011. P. 422—427. DOI: 10.1109/aim.2011.6026979.

Ссылка для цитирования

Гаврилов А.И., До М.Ч., Тун Н.Л. Современные методы отслеживания сварных швов на основе лазерного зрения для роботизированной сварки // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 10. С. 442—450. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-10-442-450.

УДК 004.942

А.О. Боровлев, А.В. Скрыпников, д-р техн. наук, проф., И.А. Высоцкая, канд. физ.-мат. наук
(Воронежский государственный университет инженерных технологий),

А.Н. Брюховецкий, канд. техн. наук, доц.
(Луганский национальный аграрный университет),

В.В. Никитин, канд. техн. наук, доц.

(Мытищинский филиал Московского государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана)

i.a.trishina@gmail.com

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ЗРИТЕЛЬНО ПЛАВНЫХ И ИЗЛОМАННЫХ ЛИНИЙ

Приведены результаты экспериментальных исследований в целях определения критических значений максимальной скорости изменения кривизны автомобильной дороги. Даны рекомендации по обеспечению плавности и безопасности дороги при автоматизированном пространственном проектировании.

Ключевые слова: лесовозная автомобильная дорога; плавность дороги; максимальная скорость изменения кривизны; кривизна дороги.

The results of experimental studies in order to determine the critical values of the maximum change rate in the road curvature are adduced. Recommendations for ensuring the smoothness and safety of the road in automated spatial design are given.

Keywords: wood-road; smoothness of the road; maximum rate of change in curvature; curvature of the road.

Для оценки плавности дороги по математическим моделям её перспективных изображений важную роль играют интервалы

значений показателей плавности, например, показатель кривизны в точках вершин $K_{с,м}$ [1]. В работе [2] установлено, что 95 % опрошен-

ных лиц изломанными считают линии, максимальная кривизна которых в точках вершин $K_{с,м} > 1300$, а прямолинейными — участки линий с кривизной $K_{с,м} \leq 0,25$. Поскольку эти величины определяют точки, в которых меняется видимая форма линий или характер поворота (прямая переходит в кривую и резкий поворот становится изломом), они рассматриваются как критические. Значение $K_{с,м} = 0,25$ можно считать нижним порогом, а $K_{с,м} = 1300$ — верхним порогом зрительно фиксируемой кривизны.

Таким образом, изогнутыми воспринимаются линии, наибольшая кривизна которых соответствует интервалу 0,25...1300, а изломанными — линии, наибольшая кривизна $K_{с,м}$ которых соответствует интервалу 1300...∞.

Интервал 0,25...1300 охватывает как плавные, так и резкие повороты (рис. 1). Определение интервала значений наибольшей кривизны, характеризующего плавные линии, имеет большое практическое значение, поскольку обеспечивает возможность проведения объективной оценки плавности линий по перспективным изображениям при автоматизированном проектировании. В работе [2] также установлено, что 95 % опрошенных лиц удовлетворительно плавными признали линии, у которых максимальная кривизна $K_{с,м} \leq 675$. С учётом принятого нижнего порога $K_{с,м} = 0,25$, можно считать, что значения максимальной кривизны, соответствующие интервалу 0,25...675, характеризуют зрительно плавные линии. Соответствие показателя плавности $K_{с,м}$ этому интервалу условно назовём первым условием зрительной плавности.

Промежуточный интервал значений наибольшей кривизны 675...1300 характеризует резкие повороты. Показатель $K_{с,м} > 1300$ уже определяет изломанные линии.

Правые кромки проезжей части в перспективных изображениях (рис. 2) можно принять за образцы зрительно плавных, резких и изломанных линий.

Для более полной оценки зрительной плавности линий необходимо в качестве критической величины кроме $K_{с,м}$ использовать также и максимальную скорость изменения кривизны $K'_{с,м}$ [3].

Проведён эксперимент в целях определения критических значений максимальной скорости изменения кривизны $K'_{с,м}$.

Для оценки подбирались перспективные изображения пространственных кривых [4], удовлетворяющие первому условию зритель-

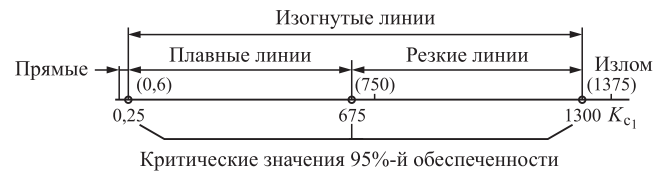


Рис. 1. Интервалы значений максимальной кривизны, характеризующие зрительно прямые, плавные, резкие и изломанные линии

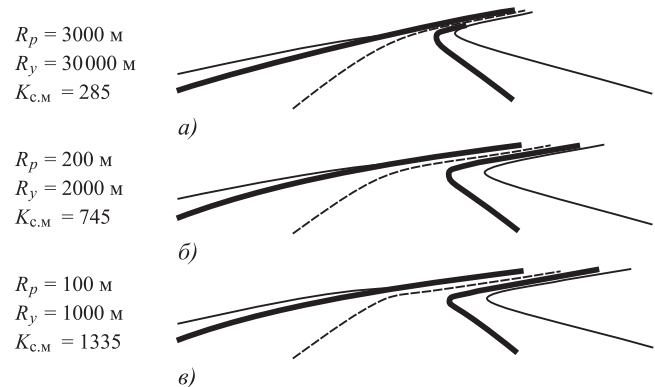


Рис. 2. Перспективные изображения пространственных кривых:

а — плавная кривая; б — резкий поворот; в — излом; R_p , R_y — радиусы кривых в плане и профиле, м

ной плавности с показателем $K_{с,м}$. Характеристики этих кривых приведены в табл. 1.

Перспективные изображения оцениваемых участков лесовозной автомобильной дороги

Таблица 1

Исходные параметры и показатели плавности $K_{с,м}$ и $K'_{с,м}$ четвёртой серии перспективных изображений

Номер перспективы	R_p , м	R_y/R_p	$K_{с,м}$	$K'_{с,м}$, м ⁻¹	$\Delta K'_{с,м}$
1	175	10	356	58,4	12,9
2	200	10	328	45,5	6,0
3	220	10	310	39,5	5,9
4	250	10	290	33,6	6,8
5	300	10	265	26,8	7,3
6	400	10	235	19,5	4,3
7	500	10	220	15,2	2,3
8	600	10	210	15,2	2,3
9	800	10	201	10,6	3,0
10	1500	10	202	7,6	1,8
11	4000	10	252	5,8	1,6
12	10 000	10	357	4,2	0,7
13	15 000	10	425	3,5	0,4

Таблица 2

Распределение оценок «плавная кривая» по показателю $K'_{с,м}$

$K'_{с,м}$	Интервалы изменения $K'_{с,м}$						
	21,2...18,2	18,2...15,2	15,2...12,2	12,2...9,2	9,2...6,2	6,2...3,2	3,2...0,2
n_i	5	18	15	16	6	0	—

Таблица 3

Распределение оценок «неплавная кривая» по показателю $K'_{с,м}$

$K'_{с,м}$	Интервалы изменения $K'_{с,м}$					
	54,5...48,5	48,5...42,5	42,5...36,5	36,5...30,5	30,5...24,5	24,5...18,5
n_i	4	14	16	12	2	2

были расположены в порядке убывания показателя $K'_{с,м}$. При этом степень их плавности возрастала в направлении слева направо.

Опрашиваемым лицам было предложено с расстояния 1 м оценить плавность правой кромки проезжей части, показать последнюю линию с правой стороны, плавность которой, по их мнению, является идеальной, а также первую линию с правой стороны, плавность которой их удовлетворяет, и, наконец, показать последнюю линию, считая с левой стороны, плавность которой их не удовлетворяет. Результаты эксперимента приведены в табл. 2 и 3.

По кривым накопленных частот (рис. 3) определено, что 95 % испытуемых зрительно плавными считали линии, для которых $K'_{с,м} \leq 10,5 \text{ м}^{-1}$, а неплавными — линии, имеющие характеристики $K'_{с,м} > 28 \text{ м}^{-1}$. Интервал значений максимальной скорости изменения кривизны $10,5...28 \text{ м}^{-1}$ характеризует линии удовлетворяющей плавности.

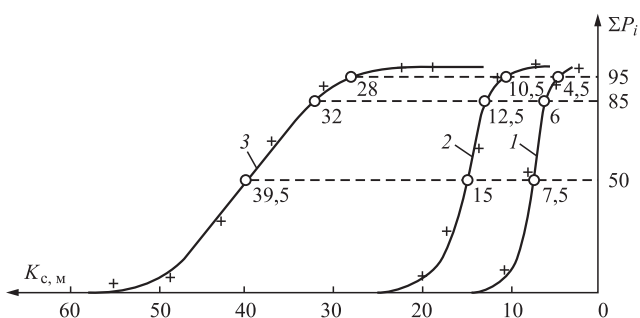


Рис. 3. Кривые накопленных частот оценок:

1 — идеально плавная кривая; 2 — плавная кривая; 3 — неплавная кривая

Значения $10,5$ и 28 м^{-1} рассматриваются как критические. На этом основании определены интервалы значений максимальной скорости изменения кривизны, характеризующие с 95%-й обеспеченностью:

- плавные линии $0 < K'_{с,м} \leq 10,5$;
- линии, удовлетворяющей плавности, $10,5 < K'_{с,м} \leq 28$;
- неплавные линии $28 < K'_{с,м} < \infty$.

Соответствие показателя плавности $K'_{с,м}$ интервалу $0...28$ назовём вторым условием зрительной плавности 95%-й обеспеченности.

При автоматизированном проектировании трассы лесовозной автомобильной дороги необходимо обратить внимание, чтобы длина пространственных кривых была достаточной, поскольку короткие кривые также создают впечатление зрительных изломов.

Как установлено в работе [5], участки кривых, расположенные за точкой, где $K_{с, 0,85} = 0,6$, воспринимаются как прямолинейные. По видимому, зрительную плавность линий можно считать обеспеченной и в тех случаях, когда кривая в плане кончается в точке, где кривизна её центральной проекции $K_{с, м} = 0,6$. Это соображение далее использовано для определения достаточной длины кривых в плане C_p в зависимости от её радиуса R_p .

При определении воспринимаемой по перспективному изображению длины кривой возможны два подхода:

- установить параметр точки, при котором $K_{с, м} = 0,6$ для наиболее изогнутой линии, т. е. для внутренней кромки проезжей части;

найти такой же параметр для оси дороги, кривизна которой во второй проеме кривой приближённо усредняет кривизну обеих кромок проезжей части. В данном случае полагаем целесообразным принять среднюю кривизну за определяющую, поэтому избрали объектом исследования ось лесовозной автомобильной дороги. Профиль исследуемых кривых принят горизонтальным.

Заключение. Из опыта оценки построенных участков известно, что при малых углах поворота кривые, расположенные на вогнутых или на ровных участках профиля, даже при большом радиусе кривой воспринимаются как неудачные. Поэтому при трассировании [6, 7] следует, по возможности, избегать малых углов, особенно на вогнутых участках продольного профиля лесовозных автомобильных дорог.

В результате исследования предлагается ввести дополнительные новые условия обеспечения зрительной плавности поворотов, которые можно сформулировать в следующем виде: при сочетании элементов плана и продольного профиля необходимо добиться, чтобы максимальная кривизна $K_{с,м}$ и скорость изменения кривизны $K'_{с,м}$ соответствовали интервалам значений, установленных путём массовой оценки плавности.

Библиографические ссылки

1. **Литвинов А.С.** Управляемость и устойчивость автомобиля. М.: Машиностроение, 1971. 416 с.

2. **Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Брюховецкий А.Н., Никитин В.В.** Условия зрительной плавности пространственных кривых при автоматизированном проектировании лесовозных автомобильных дорог // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 395—397.

3. **Вырко Н.П.** Строительство и эксплуатация лесовозных дорог: учебник. Минск: БГТУ, 2005. 446 с.

4. **Чирков Е.В., Высоцкая И.А., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Никитин В.В.** Методические рекомендации по автоматизированному проектированию трассы лесовозной автомобильной дороги с применением методов оптимизации // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 60—65.

5. **Бурмистров Д.В.** Рабочая гипотеза ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог и её экономико-математическое развитие // Лесной вестник. ForestryBulletin. 2018. Т. 22. № 5. С. 69—76.

6. **Чирков Е.В., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Прокопец В.С., Высоцкая И.А.** Экспериментальное исследование методов автоматизированного проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 1. С. 29—33.

7. **Саблин С.Ю., Высоцкая И.А., Скрыпников А.В., Тихомиров П.В., Брюховецкий А.Н., Жук А.Ю.** Формирование оптимальных схем этапного развития лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1 (49). С. 82—85.

Ссылка для цитирования

Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Брюховецкий А.Н., Никитин В.В. Автоматизированное проектирование продольного профиля лесовозных автомобильных дорог с учётом влияния зрительно плавных и изломанных линий // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 10. С. 450—453.

Требования к оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003, ГОСТ Р 7.0.5—2008 и ГОСТ Р 7.07—2021 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No., том — Vol., страница — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом <http://translit.ru/>.

УДК 629.064:629.33

И.Ф. Дьяков, д-р техн. наук

(Ульяновский государственный технический университет),

Ю.В. Моисеев, канд. экон. наук

(АО «Система безопасности», г. Ульяновск)

i. dyakov@ulstu.ru

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Приведён анализ энергозатрат при движении транспортного средства. Показана зависимость угла закрутки коленчатого вала от порядка работы цилиндров двигателя. Рассмотрены энергозатраты при выполнении транспортной работы и при движении транспортного средства с грузом и без груза. Приведены сравнительные оценки автомобилей различных марок по энергозатратам.

Ключевые слова: потери энергии; петля гистерезиса; угол закрутки вала; сравнительная оценка автомобиля; технологичность трансмиссии.

The analysis of energy consumption during the movement of a vehicle is considered. The dependence of the crankshaft twist angle from the operating order of the engine cylinders is shown. Energy consumption at performing transport work and moving a vehicle with and without cargo are considered. Comparative assessments of various brands cars in terms of energy consumption are given.

Keywords: energy losses; hysteresis loop; shaft twist angle; comparative assessment of the car; the manufacturability of the transmission.

Введение. Движение транспортного средства сопровождается потерями энергии двигателя как на колебание поддрессоренной массы, так и на вращение масс трансмиссии. Энергозатраты, зависящие от перевозимого груза — вынуждающей силы поддрессоренной системы — и системы моторных масс, могут многократно возрастать с изменением нагрузочного режима и при неровности дороги. При проектировании и расчёте транспортного средства стремятся к созданию оптимальной конструкции, которая имела бы максимальный КПД, минимальные массу и расход топлива, с применением оптимальных технологических процессов при его изготовлении [1]. Известно, что проектирование оптимальной конструкции является сложной, многопараметрической задачей с различными видами критериев и ограничений.

Цель работы — оценка технологичности конструкции трансмиссии путём сравнения различных марок автомобилей при выполнении ими транспортной работы с грузом и без груза.

Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи:

1. Обосновать использование безразмерного оценочного показателя, непосредственно

связанного (количественно) с энергозатратами при выполнении транспортной работы.

2. Определить технологичность трансмиссии по энергозатратам при выполнении транспортной работы.

Метод решения. В теории автомобиле- и тракторостроения существуют показатели, позволяющие оценивать конструктивное совершенство как машины в целом, так и её агрегатов [2]. В данном случае совершенство конструкции транспортного средства определялось по потерям энергии в трансмиссии при выполнении транспортной работы.

Основной метод оценки совершенства транспортного средства — расчётно-экспериментальный. При анализе характера движения транспортного средства учитывают множество силовых факторов, которые влияют на надёжность элементов [3—5], передающих силовой поток к ведущим колёсам.

Любой режим движения транспортного средства реализуется за счёт энергии, которая получается при сгорании топлива. Теплота, выделяемая при сгорании топлива, преобразуется в механическую работу. При установленном режиме движения полученную при сгорании топлива в двигателе транспортного средства энергию J_0 определяют по формуле

$$J_Q = Q_s L H_Q u_{тр} \gamma_T k, \quad (1)$$

где Q_s — путь расход топлива, $\text{дм}^3/\text{км}$; L — путь, пройденный транспортным средством, км ; H_Q — теплотворная способность топлива, $\text{ккал}/\text{кг}$; $u_{тр}$ — передаточное число трансмиссии; γ_T — плотность топлива, $\text{кг}/\text{дм}^3$; $k = 1,162 \cdot 10^{-3}$ — переводной коэффициент при переходе с килокалорий в киловатты.

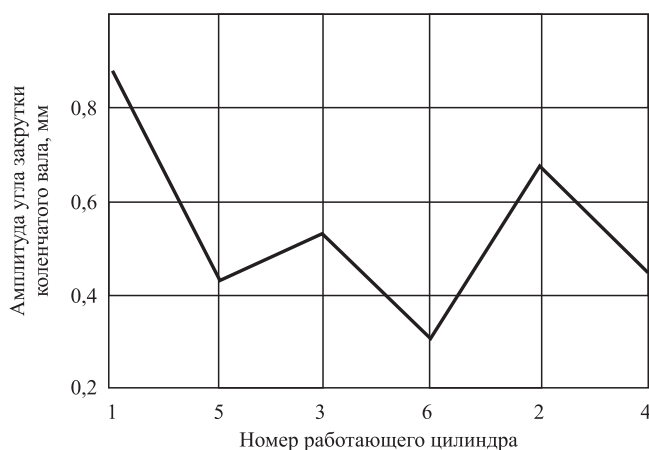
Часть энергии J_Q расходуется на преодоление сопротивления движению и износ деталей, часть — на выполнение транспортной работы. Сопротивление движению влияет на основные свойства автотранспортных средств (АТС) — динамичность, экологичность, тягово-скоростные и топливно-экономические характеристики. Анализ этих показателей способствует достижению основной цели — снижению непроизводительных энергозатрат, которые обеспечивают необходимые условия эксплуатации АТС. Величину J_Q можно рассматривать как совершенство конструкции при оценке различных АТС на этапе проектирования.

В процессе работы двигателя на кривошипы коленчатого вала действуют периодически изменяющиеся крутящие моменты, сдвинутые по фазе в соответствии с порядком работы цилиндров двигателя. Крутящие моменты, приложенные к каждому кривошипу коленчатого вала, представляют собой сложные периодические функции, которые могут быть представлены суммами элементарных возбуждающих моментов с различными амплитудами, фазами, с кратными частотами. Вследствие этого в конструкции коленчатого вала возникают переменные деформации кручения и изгиба. При снятии нагрузки на коленчатом валу возникают упругие восстанавливающие моменты. Вследствие разницы между возбуждающими (при рабочем ходе поршня) и восстанавливающими моментами в конце рабочего хода цилиндра (за счёт упругих свойств коленчатого вала), действующими на отдельных его участках, циклически изменяются в плоскости вращения коленчатого вала угловые знакопеременные деформации. С увеличением числа циклов $N_{ц}$ за счёт нагружения при рабочем ходе цилиндров двигателя и разгрузки коленчатого вала возникают петли гистерезиса силовых характеристик. При отсутствии возмущающих сил, когда крутильная система совершает собственные колебания, амплитуды смещения отдельных масс коленчатого вала будут неодинаковыми. Отыскать значения ам-

плитуд смещений масс системы не представляется возможным, так как с ростом числа частот собственных колебаний в соответствии с правилом Крамера амплитуды колебаний масс также растут, т. е. будет иметь место известное в механике явление резонанса. Резонанс будет иметь место, если число колебаний крутильной системы в минуту, соответствующее круговой частоте её собственных колебаний, совпадет с частотой для какой-либо гармоники в рабочем диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя.

Для упрощения эксперимента на стенде использовали распределения по длине коленчатого вала конкретных амплитуд углов закрутки отдельных масс. Измеренные площади петли гистерезиса силовых характеристик изменяются в зависимости от расстояния между работающим цилиндром и маховиком, расположенным на конце коленчатого вала. Ближе к маховику последнего цилиндра угол закрутки меньше, чем у первого цилиндра. Тогда можно представить, что различным углам закрутки соответствуют свои площади петли гистерезиса для отдельных участков коленчатого вала (рисунок). Исходя из этого можно сделать вывод, что угол закрутки коленчатого вала зависит от порядка работы цилиндров двигателя.

Энергозатраты для числа циклов $N_{ц}$ определялись по площади петли гистерезиса для одного цикла рабочего процесса двигателя (вначале происходят кручение и изгиб, потом восстановление угла поворота коленчатого вала). При этом использовалась следующая формула для энергозатрат при повороте коленчатого вала от угла φ_1 до угла φ_2 на его i -м участке:



Изменение амплитуды угла закрутки коленчатого вала шестицилиндрового четырёхтактного двигателя

$$J(N_{\text{ц}})_i = k_{\text{п}} A_{\text{Г}} \mu_{\tau_i, \varphi_i} \sum_{i=\varphi_1}^{\varphi_2} \varphi_i l_i / (2\pi), \quad (2)$$

где $k_{\text{п}}$ — коэффициент перевода, $k_{\text{п}} = 2,73 \cdot 10^{-3}$ при переходе с ньютон-метров на киловатт-часы; $A_{\text{Г}}$ — приведённая площадь петли гистерезиса, м^2 ; μ_{τ_i, φ_i} — масштабный коэффициент; l_i — i -й участок длины исследуемого коленчатого вала; φ_i — угол закрутки i -го участка коленчатого вала.

Площади петли гистерезиса силовых характеристик коленчатого вала определялись на стенде с учётом нагрузки от моментов на коленчатый вал, соответствующих моментам на двигателе: инерционного момента $M_{\text{ин}} = J_i \ddot{\varphi}_i$, где J_i — полярный момент инерции вала; упругого момента $M_{\text{уп}} = C_i (A_{\varphi_2} - A_{\varphi_1})$, где $C_i = GJ_i / l_i$ — полярная жёсткость i -го участка, G — модуль сдвига материала, l_i — длина i -го участка; A_{φ_1} , A_{φ_2} — амплитуды угловых смещений начального и конечного сечения участков. Для первого участка $A_{\varphi_1} = 0$, так как для этого участка φ_1 соответствует жёсткозакреплённому концу вала. По значениям указанных моментов определялась суммарная сила, действующая на коленчатый вал, а по ней — касательные напряжения τ и напряжения прочности. Нагружение и разгружение вала на стенде проводились ступенчато — для каждого участка коленчатого вала в отдельности.

По формуле (2) можно также определить петли гистерезиса силовых характеристик для коробки передач (блока шестерён и вторичного вала). Суммарные энергозатраты $J(N_{\text{ц}})$ определяются как сумма энергозатрат для отдельных участков $J(N_{\text{ц}})_i$: $J(N_{\text{ц}}) = \sum_{i=1}^n J(N_{\text{ц}})_i$. Карданная передача и полуоси представляют как цельные участки.

Потери энергии для ведущей шины определяются по формуле

$$J_{S_{\text{ш}}} = 2,723 \cdot 10^{-6} \tau A_{\text{Г}} \times \\ \times \operatorname{sgn} \dot{A} \frac{1}{l_{\tau} l_{\text{ц}}} \mu_{\eta_{\text{ш}}, N_{\text{ц}}} V_{\text{ш}} \operatorname{tg} \alpha / (2\pi), \quad (3)$$

где l_{τ} , $l_{\text{ц}}$ — амплитуды по напряжению и циклам нагружения соответственно; $A_{\text{Г}}$ — площадь петли гистерезиса; $\mu_{\eta_{\text{ш}}, N_{\text{ц}}}$ — масштабные коэффициенты по координатным осям; α — угол наклона площади петли гистерезиса шины; $V_{\text{ш}}$ — объём шины; \dot{A} — скорость изменения коэффициента сухого трения между слоями шины.

Часть энергии двигателя J_Q идёт на износ трущихся поверхностей поршневой группы,

подшипников скольжения, зубчатых передач, виброакустические колебания трансмиссии и подрессоренной массы, усталостное разрушение деталей.

Энергозатраты на транспортную работу J_S определяют с помощью выражения

$$J_S = v_{\text{ср}} \{ [m_i (k_{\gamma} \beta + \eta_{\sigma}) \psi] + z + \\ + F_{\text{тр}} + F_{\text{г.с}} + F_w + F_j \} t_{\text{дв}} \frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{д}}} \cdot 2,73 \cdot 10^{-6},$$

где $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость движения АТС; m_i — масса АТС ($i = 1$ — полная, $i = 2$ — снаряжённого — без груза); k_{γ} , β — коэффициенты использования грузоподъёмности и пробега соответственно; ψ — суммарное дорожное сопротивление движению; z — масса водителя и пассажиров; $F_{\text{тр}}$, $F_{\text{г.с}}$, F_w , F_j — сила трения трущихся частей, сила гидродинамического сопротивления, сила аэродинамического сопротивления воздуха и сила инерции вращающихся масс соответственно; $t_{\text{дв}}$ — время движения АТС; $r_{\text{к}}$, $r_{\text{д}}$ — радиус качения и динамический радиус шины соответственно.

После определения рассмотренных выше энергозатрат можно уточнить потери энергии на износ трущихся поверхностей цилиндропоршневой группы двигателя, виброакустические, инерционные колебания подрессоренной массы, трансмиссии путём вычитания соответствующих затрат при холостом ходе J_{S_x} из общего значения энергии двигателя при равномерном движении J_Q . Энергозатраты J_{S_x} можно представить в виде $(J_Q - J_{S_x}) / J_Q$. Отсюда следует, что соотношение $1 - \frac{J_{S_x}}{J_Q} = \eta_{\text{сов}}$ — характеризует совершенство (технологичность) конструкции трансмиссии, которое зависит от передаваемых на неё моментов двигателя, силы трения и силы гидродинамического сопротивления вращающихся масс, напряжения усталостного разрушения деталей, передающих крутящий момент, от свойств шин ведущих колёс.

Результаты анализа энергозатрат. Для учёта расхода топлива при движении используется нормативный расход. Если фактический расход топлива превышает нормативный, то транспортное средство подвергается диагностике. В качестве диагностических параметров используют эффективную мощность, расход топлива, состав отработавших газов, уровни шума и вибрации, давление масла. Эффективная мощность и расход топлива являются важными объективными показателями общего состояния двигателя.

Энергозатраты при равномерном движении автомобилей разных марок

Марка автомобиля	Номинальная грузоподъёмность, кг	Контрольный расход топлива, дм ³ /100 км	Энергия двигателя при сгорании топлива, кВт·ч	Энергия, затраченная на транспортную работу, кВт·ч		Коэффициент совершенства трансмиссии	
				с грузом	без груза	с грузом	без груза
ГАЗ-3507-01	4250	19,6/60*	1,131	1,077	0,602	0,0485	0,467
УАЗ-1501	800	18,9/90	0,906	0,748	0,629	0,174	0,305
КамАЗ-5420	8000	26,0/50	3,842	1,555	0,624	0,595	0,837
ЗИЛ-45067	5700	36,7/60	4,199	1,686	1,136	0,598	0,730
КрАЗ-256	12 000	38,5/60	3, 746	2,208	0,795	0,143	0,787

* В знаменателе указана скорость движения, км/ч, при которой определяется расход топлива.

В таблице приведены результаты анализа энергозатрат при равномерном движении автомобилей по асфальтированной дороге. Используя их, можно провести сравнительную оценку различных марок АТС. Видно, что автомобиль УАЗ-1501 отличается от автомобиля КамАЗ по грузоподъёмности в 10 раз, а по затратам энергии на транспортную работу почти в два раза, т. е. автомобиль КамАЗ является более экономичным, чем автомобиль УАЗ. По расходу энергии на пробег без груза более экономичным оказался автомобиль ГАЗ, в то же время автомобиль ЗИЛ расходует энергии на тонну перевозимого груза более чем в 1,5 раза. Автомобиль КрАЗ по энергозатратам на транспортную работу отличается от автомобиля ЗИЛ не более чем в 1,3 раза. При этом самый низкий коэффициент совершенства трансмиссии у автомобиля УАЗ-1501, а самый высокий — у КамАЗ-5420.

Заключение. Представленные в статье данные могут быть полезны для конструкторов автомобильной техники при её проектировании. Можно провести анализ энергозатрат и оценить совершенство трансмиссии для различных марок транспортных средств. Приведённые выражения для определения энергозатрат также позволяют выявить ненадёжные элементы в трансмиссии или пневмоколёсах и повысить эффективность работы транспортного средства.

Библиографические ссылки

1. Бахмутов С.В., Филонов А.Н., Баулина Е.Е. Совершенствование процесса рекуперации энергии гибридного автомобиля // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 7. С. 101—112.
2. Пирковский Ю.В., Шухман С.Б. Теория движения полноприводного автомобиля (прикладные вопросы оптимизации конструкции шасси). М.: ЮНИТИ-ДАН, 2001. 230 с.
3. Рассоха В.И. Методическое обеспечение стендовых испытаний на усталость узлов рамных металлоконструкций мобильных машин // Вестник Оренбургского государственного университета. 1999. № 1. С. 62—66.
4. Афонин М.А., Клименко А.Е., Варнаков Д.В. Применение GALS-технологии информационной поддержки на стадии эксплуатации автотранспортных средств как способ обеспечения их надежности // Вестник Военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. 2018. № 2 (46). С. 41—50.
5. Thomas J., Hwang H., West B., Huff S. Прогнозирование экономии топлива легковых автомобилей в зависимости от скорости на шоссе // SAE Intern. J. Passeng Cars Mech. Syst. 2013. No. 6 (2). P. 859—875. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://papers.sae.org/-01-1113/> (дата обращения: 15.02.2021). DOI: 10.4271/2013-01-1113.

Ссылка для цитирования

Дьяков И.Ф., Моисеев Ю.В. Анализ энергозатрат при проектировании автотранспортного средства // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 10. С. 454—457.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу:
«Пресса России» — индекс **27838**.

УДК 004.932.2

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-10-458-461

А.В. Затонский, д-р техн. наук, проф., **К.А. Федосеева**
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Березниковский филиал)

z xenon@narod.ru

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА СИНХРОНИЗАЦИИ ВИДЕОСЪЁМКИ ФЛОТАЦИОННОЙ МАШИНЫ С ПОЛОЖЕНИЕМ ПЕНОГОНА

Описана проблема определения положения пеногона при обработке видеопотока с калийных флотационных машин. Показана невозможность применения разработанных ранее алгоритмов синхронизации съёмки с вращением пеногона. Предложен простой алгоритм, в отличие от предыдущих основанный на определении наиболее затемнённого кадра. При опробовании алгоритма по данным 14 съёмок средняя погрешность синхронизации составила всего 2 %.

Ключевые слова: калийная промышленность; флотационная машина; техническое зрение; синхронизация.

The problem of determining the position of foam extinguisher when processing a video stream from potash flotation machines is described. The impossibility of using the previously developed algorithms for synchronizing shooting with foam extinguisher rotation is shown. A simple algorithm in contrast to the previous ones based on determining the most darkened frame is proposed. When testing the algorithm using data from 14 surveys, the average synchronization error was only 2 %.

Keywords: potash industry; flotation machine; technical vision; synchronization.

Введение. При обогащении полезных ископаемых важную роль играет процесс пенной флотации. Стандартный способ пенной флотации включает в себя смешивание водного шлама, который содержит тонко измельчённые частицы руды, с пенообразующим или вспенивающим веществом для получения пены. Визуальные признаки пены, такие как цвет, форма размер пузырьков, текстура, толщина и вязкость пены, тесно связаны с качеством конечного продукта. Как правило, управление процессом флотации осуществляется вручную человеком-оператором, который принимает большинство решений об оперативном управлении на основе внешнего вида пены. Недостаточный опыт оператора зачастую приводит к неоптимальному управлению процессом. Кроме того, поскольку принятые оператором решения по изменению процесса являются субъективными, его результаты могут различаться от смены к смене. Для исключения человеческого фактора в подобных системах регулирования применяются системы компьютерного зрения. Например, авторы работы [1] внедрили компьютерное управление флотацией медных руд, при которой пена является плотной, глянцевой,

что позволяет легко распознать границы пузырьков на изображениях поверхности пены, если для этого созданы необходимые условия съёмки. Подобный подход успешно применяется при анализе не только пен полиметаллических флотомашин, но и угольных пен, и пен, возникающих в пищевых производствах [2, 3]. Однако данные разработки не могут быть применены при анализе изображения флотации калийной руды, так как пена калийной руды не контрастная, плотная с большим разбросом диаметров пузырьков.

Авторы работы [4] предложили метод статистического анализа пены на основе распознавания бликов от пузырьков, который был модифицирован в работе [5]. В этих работах авторы показывают возможность идентификации переходных процессов в камере флотационной машины по виду пены. Алгоритм получения изображения пены состоит из нескольких этапов. Сначала проводится бинаризация изображения. После этого удаляются шумы и области сплошной засветки. Затем выделяются блики и выполняется их подсчёт с помощью ABC-алгоритма [6]. Центры бликов определяются как центры охватывающих их прямоугольников, по которым можно

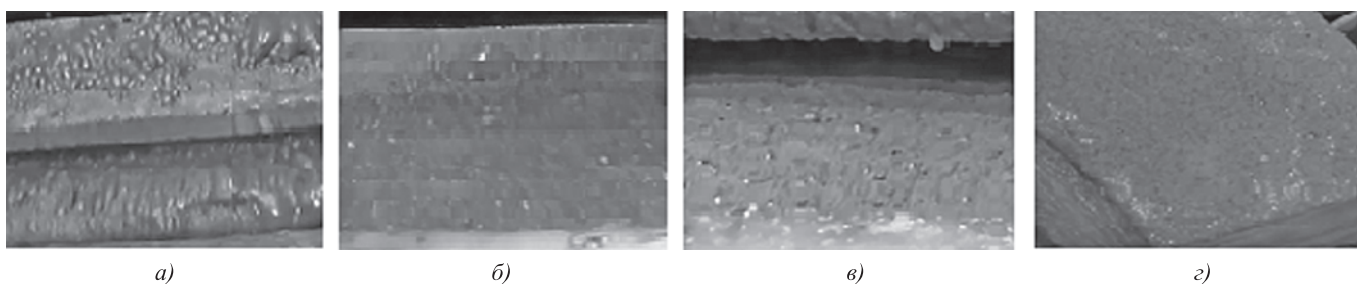


Рис. 1. Примеры изображений пены шламовой (а), сильвиновой основной (б), сильвиновой перечистой (в) и пневмоэжекторной перечистой (з) ФМ

анализировать, например, число пузырьков, среднее арифметическое и среднемедианное расстояния между пузырьками, неравномерность расположения пузырьков в камере. Исследования метода и разработка специального программного обеспечения [7] производились на материалах съёмок перечистой флотационной машины (ФМ) на ПАО «Уралкалий».

Постановка задачи. Одной из проблем, возникающих при обработке видеопотока, является синхронизация съёмки с вращением пеногона. Частота вращения не кратна частоте кадров и может изменяться время от времени. Необходимо, чтобы обрабатывались только те кадры, которые получены при положении лопастей пеногона, перпендикулярном к оси камеры. Иначе лопасти будут попадать в обрабатываемую область кадра. В случае небольшой рассинхронизации выстроится последовательность кадров, в которой лопасть всё больше и больше входит в обрабатываемую область. Разумеется, это вызовет ложное срабатывание диагностики отклонений технологического процесса.

Проблема синхронизации решена в работе [7] на материале съёмок пен в сильвиновой машине ПАО «Уралкалий». Лопастей пеногона в этой ФМ закреплены жёстко, под постоянным углом. Естественное освещение в цехе слабое, поэтому точечная подсветка оказывает большое влияние на выбор режима видеокамеры. Иначе говоря, камера «считает» наиболее освещённым участком именно подсвеченный и выставляет диафрагму так, чтобы он выглядел наилучшим образом. Поэтому блик света от источника на лопасти пеногона существенно увеличивает среднюю освещённость обрабатываемой части кадра. В связи с этим работоспособным оказался алгоритм, согласно которому синхронизация выполнялась следующим образом. Обнаруживался

долгий и непрерывный участок роста освещённости (более 10 кадров). За ним обнаруживался короткий непрерывный участок её снижения (3—4 кадра). (Участки роста и снижения идентифицировались по знаку линейной аппроксимации всех точек тренда, входящих в участок.) В его конце вырабатывался сигнал синхронизации, т. е. констатировалось нужное положение лопастей пеногона. Захват кадра для обработки осуществлялся в момент поступления сигнала синхронизации.

Однако в производстве калийных удобрений используются не только сильвиновая, но и другие виды флотации: шламовая и пневмоэжекторная (колонная). Последняя применяется как перечистная ступень флотации на ООО «Еврохим — Усольский калийный комбинат» (УКК). В колонной ФМ образуется пена, визуально больше напоминающая губку, в отличие от машин других типов (рис. 1).

Кроме того, в условиях УКК достаточно интенсивное общее освещение. На рис. 1, б...з, видно, что тот же самый точечный источник света, что и использовавшийся при съёмках на ПАО «Уралкалий», вызывает более слабые блики. В случае если в кадр вынужденно попадает светлая часть конструкции (рис. 1, б), камера подстраивает экспозицию так, что пена получается тёмной, а блики — слабо выраженными. Увеличивать светимость источника, во-первых, нельзя бесконечно, а во-вторых, после превышения некоторого уровня это начнёт приводить к большим областям засветки, исключаемым из обработки согласно работам [5, 7]. В этих условиях съёмки описанный выше алгоритм работал плохо, выдавая до 50 % ошибок синхронизации.

Поэтому целью данной статьи является разработка такого алгоритма синхронизации обработки кадров с вращением пеногона, который можно применять на всех ФМ обоих предпри-

ятий (исключая, конечно, пневмоэжекторную, где пеногон конструктивно отсутствует).

Алгоритм синхронизации обработки кадров с вращением пеногона. Характер колебаний освещённости L в зависимости от номера кадра для ФМ разного типа достаточно сильно различается (рис. 2). При визуальном анализе трендов становится очевидным, что верхние пики тренда, по которым ранее устанавливалась синхронизация, имеют очень разнородный характер. А нижние пики, наоборот, достаточно компактные и узкие. На некоторых трендах, как на тренде с ФМ № 2 «Еврохим — УКК», имеется несколько близкорасположенных пиков минимальной освещённости, но на большинстве обработанных графиков такой пик только один. Поэтому возникла идея анализировать именно нижние пики, т. е. точки минимальной освещённости кадра, а не максимальной. Очевидно, что обнаруживать такой пик в i -й точке тренда по условиям $L(i) < L(i - 1)$ и $L(i) < L(i + 1)$ нельзя, так как любой шум, любая осцилляция освещённости из-за внешних условий (например, дрожания источника света) немедленно даст ложный пик. Кроме того,

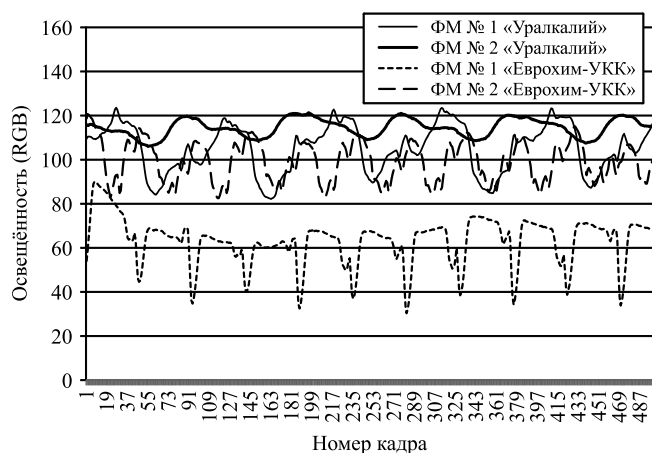


Рис. 2. Примеры колебаний освещённости в зависимости от номера кадра на разных ФМ

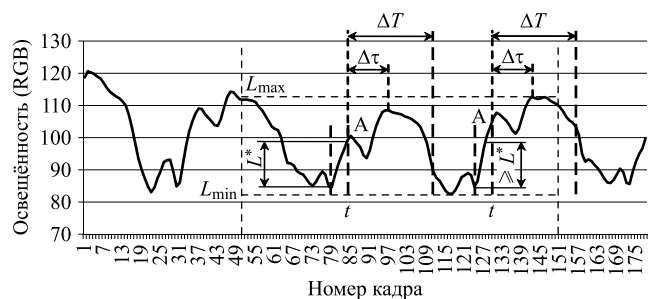


Рис. 3. Пояснения к формированию задержки распознавания пиков ΔT

для ряда трендов за полупериод оборота пеногона не наблюдаются несколько пиков, включая ложные. Рассмотрим подробнее тренд ФМ № 2 «Еврохим-УКК» (рис. 3).

Нет никакой разницы, какое именно положение пеногона удастся распознавать. Если мы получим возможность распознавать некоторое положение пеногона (например, обозначенное на рис. 3 символом «А»), то выбрать кадр для обработки мы сможем через любое заданное время Δt , одинаковое для всех оборотов пеногона. Однако положение «А» от оборота к обороту будет изменяться, если частота вращения пеногона не кратна частоте кадров видеоканалы. В общем случае именно так и произойдёт.

Будем искать такие участки тренда, на которых есть существенный рост освещённости за заданный промежуток времени Δt . Термин «существенный» требует расшифровки. Определим максимальную L_{\max} и минимальную L_{\min} среднюю освещённость обрабатываемой части кадра за некоторый период времени (на рис. 3 это число отсчётов N , равное 100 — от 50-го до 150-го). Будем считать моментом синхронизации t такую точку тренда «А», значение освещённости в которой $L(t)$ значительно больше, чем $L(t - \Delta t)$, т. е. $L(t) - L(t - \Delta t) \geq L^*$, где порог разности освещённости, при котором констатируется момент синхронизации, $L^* = (L_{\max} - L_{\min})/R$, $R \in [2, 4]$ в зависимости от условий съёмки.

Для обработки будем выбирать кадр, поступивший через Δt после момента синхронизации. Поскольку примерная частота вращения пеногона ω известна, чтобы избежать ложных распознаваний точек «А», будем прекращать анализ тренда на период ΔT , выбирая эти времена так, чтобы $\Delta t + \Delta T < 1/\omega$. Значения времени вычисления разности освещённости Δt , задержки распознавания пиков ΔT , момента выборки кадра i для обработки после констатации синхронизации Δt кратны номеру кадра i и могут быть рассчитаны исходя из частоты видеосъёмки. Даже если в начале видеопотока произойдет случайное некорректное распознавание, через несколько оборотов пеногона данный алгоритм «подхватит» правильный момент синхронизации и будет корректно определять точки «А» в дальнейшем.

Обработка результатов. Предложенный алгоритм значительно проще, чем изложенный в работе [7]. Кроме того, он более работо-

Результаты проверки работоспособности алгоритма

Номер съёмки	Тип ФМ	Наличие внешнего источника света	Распознанные моменты синхронизации		Доля ошибок, %
			Общее число	В том числе ошибок	
1	Основная	Да	13	0	0
2	Основная	Да	17	0	0
3	Шламовая	Да, нет	25	0	0
4	Шламовая	Да	8	0	0
5	Перечистная	Да	26	0	0
6	Основная	Да, нет	31	0	0
7	Перечистная	Да	7	0	0
8	Основная	Да	42	0	0
9	Основная	Да	280	0	0
10	Перечистная	Да	237	5	2,1
11	Перечистная	Да	223	4	1,8
12	Перечистная	Да	35	0	0
13	Перечистная	Да	248	8	3,2
14	Перечистная	Нет	212	11	5,2

способен. После съёмок ФМ «Еврохим—УКК» обнаружилось, что алгоритм, приведённый в работе [5], некорректно обрабатывает их. Для проверки нового алгоритма обработали результаты 14 съёмок разной продолжительности, произведённых на ФМ разных типов двух предприятий (таблица).

Всего распознано 1404 момента синхронизации, в том числе 28 ошибочно. Таким образом, средняя ошибка составляет 2 %. Съёмки № 10...12 проводились на перечистой машине, расположенной в затемнённом помещении. Они характеризуются наибольшим числом ошибок синхронизации. Не исключено, что его можно уменьшить путём подбора параметров N , R , Δt , ΔT . Однако такая задача не ставилась, так как именно на этих ФМ использование технического зрения в производстве пока не планируется. Кроме того, по резуль-

татам работ [4, 5, 7], обработка видеопотока, полученного без внешнего источника света (съёмка № 14, где констатируется максимальное число ошибок), бесперспективна с точки зрения управления процессом флотации. На тех же ФМ, где использование технического зрения в будущем предполагается, получено нулевое число ошибок синхронизации.

Заключение. Поставленная в данной статье задача решена. Разработан простой и эффективный алгоритм, обеспечивающий выделение кадров для обработки с достаточно низкой погрешностью относительно положения пеногона ФМ.

Библиографические ссылки

1. Романенко С.А., Оленников А.С. Опыт внедрения видеокамер FROTHMASTER на обогатительной фабрике «Зеленая гора-2» // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 23—28.
2. Tan J., Liang L., Peng Y., Xie G. The Concentrate Ash Content Analysis of Coal Flotation Based on Froth Images // Minerals Engineering. 2016. No. 92. P. 9—20.
3. Jahedsaravani A., Massinaei M., Marhaban M.H. An Image Segmentation Algorithm for Measurement of Flotation Froth Bubble Size Distributions // Measurement. 2017. No. 111. P. 29—37.
4. Затонский А.В., Варламова С.А. Использование бликовых отражений для автоматического распознавания параметров пены при флотации калийных руд // Обогащение руд. 2016. № 2. С. 49—56.
5. Затонский А.В., Малышева А.В. Модернизация алгоритмов бликового распознавания параметров пенного слоя при флотации калийных руд // Обогащение руд. 2018. № 2. С. 35—41.
6. Hoshen J., Kopelman R. Percolation and Cluster Distribution. I. Cluster Multiple Labeling Technique and Critical Concentration Algorithm // Physical Review B. 1976. No. 14. P. 3438—3445.
7. Малышева А.В. Определение параметров процесса флотации калийной руды по видеоизображению поверхностной пены / Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы междунар. научн.-практ. конф. (г. Тамбов, 15—17 ноября 2017 г.). Тамбов, 2017. С. 148—154.

Ссылка для цитирования

Затонский А.В., Федосеева К.А. Модификация алгоритма синхронизации видеосъёмки флотационной машины с положением пеногона // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 10. С. 458—461. DOI^{10.36652/0869-4931-2021-75-10-458-461}.

УДК 628.9

С.А. Микаева, д-р техн. наук, **А.С. Микаева**, канд. экон. наук,
Ю.А. Журавлёва, канд. техн. наук, **А.А. Дюкин**
 (МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

mikaeva@npo.lit.ru

КВАРЦЕДУВНЫЙ СТОЛ И ГАЗОВАЯ ГОРЕЛКА

Описаны кварцеводувный стол и газовая горелка, используемые для изготовления ультрафиолетовых бактерицидных ламп. Проведены их основные технические характеристики и комплектация.

Ключевые слова: кварцеводувный стол; газовая горелка; технические характеристики; оборудование; порядок работы.

A quartz table and a gas burner used for the manufacture of ultraviolet bactericidal lamps are described. Their main technical characteristics and equipment are considered.

Keywords: quartz table; gas burner; technical characteristics; equipment; operating procedure.

Эффективным способом обеззараживания в условиях пандемии коронавируса COVID-19 является использование ультрафиолетового (УФ) излучения. Технология такого обеззараживания воды, воздуха и твёрдых поверхностей основана на бактерицидном действии УФ-излучения. УФ-излучение — электромагнитное излучение, занимающее диапазон длин волн между рентгеновским и видимым излучением (от 100 до 400 нм). Различают несколько участков спектра УФ-излучения, имеющих разное биологическое воздействие: УФ-А — 315...400 нм; УФ-В — 280...315 нм; УФ-С — 200...280 нм; вакуумный УФ — 100...200 нм. Диапазон УФ-С часто называют бактерицидным из-за его высокой обеззараживающей эффективности по отношению к бактериям и вирусам. Наибольшим бактерицидным эффектом обладает излучение в интервале длин волн от 205 до 280 нм, а максимум бактерицидной чувствительности микроорганизмов приходится на длину волны 265 нм [1—4]. Поэтому производство оборудования и установок для изготовления источников света УФ-излучения выходит на новый уровень [5, 6]. В число основного оборудования для производства УФ-ламп входят кварцеводувный стол и газовые горелки.

На работу кварцеводувного стола распространяются все требования по технике безопасности при эксплуатации электрооборудования, питание которого осуществляется напряжением 380 В и частотой 50/60 Гц [7—9]. Корпусы кварцеводувного стола, пульта управления и форвакуумного насоса должны быть

надёжно заземлены. При возникновении пожара оборудование следует обесточить и перекрыть подачу газов. Тушение пожара следует проводить средствами пожаротушения, не проводящими электрический ток. Эксплуатировать кварцеводувный стол следует только при включенной вентиляции.

Технические характеристики кварцеводувного стола

Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Не более 1354 × 924 × 2131
Материал каркаса	Алюминиевый профиль с панелями из сплава Д16Т
Материал корпуса пульта управления	Окрашенная гальванически обработанная сталь
Масса, кг	Не более 165
Тип используемого форвакуумного насоса	2НВР-5ДМ
Топливная рабочая среда	Метан (природный газ)
Давление природного газа, МПа	0,1...0,5
Расход природного газа, м ³ /ч	0,5...2,0
Давление кислорода, МПа	0,1...1,0
Расход кислорода, м ³ /ч	1,5...6,0
Подача природного газа и кислорода	От общей сети
Тепловыделение в пульте управления, Вт	Не более 50
Степень пыле- и влагозащитности пульта управления	IP 54
Напряжение питания, В	380 ± 38
Частота питающего напряжения, Гц	50
Максимальная потребляемая мощность, Вт	Не более 550

Климатическое исполнение	УХЛ (изделие предназначено для эксплуатации в районах с умеренным и холодным климатом)
Категория размещения	4 (изделие предназначено для эксплуатации в закрытых отапливаемых и вентилируемых помещениях) по ГОСТ 15150—69
Температура окружающего воздуха, °С	+1...+35
Относительная влажность окружающего воздуха при +25 °С, %	Не более 80

Кварцеводувный стол (рис. 1) состоит из стола 1, установленного на регулируемых опорах 11. На передней панели стола находится пульт управления 2, предназначенный для подачи питания на форвакуумный насос 3 и управления им. Форвакуумный насос используется для создания вакуума в целях проверки кварцевых колб на герметичность и устанавливается на нижней панели стола. На поверхности стола установлены калибр 4, предназначенный для проверки и контроля выполнения технологических операций по выпуску продукции, газовая горелка 5 и экран 8. В верхней части экрана расположен воздушный клапан 10, подключаемый к вы-

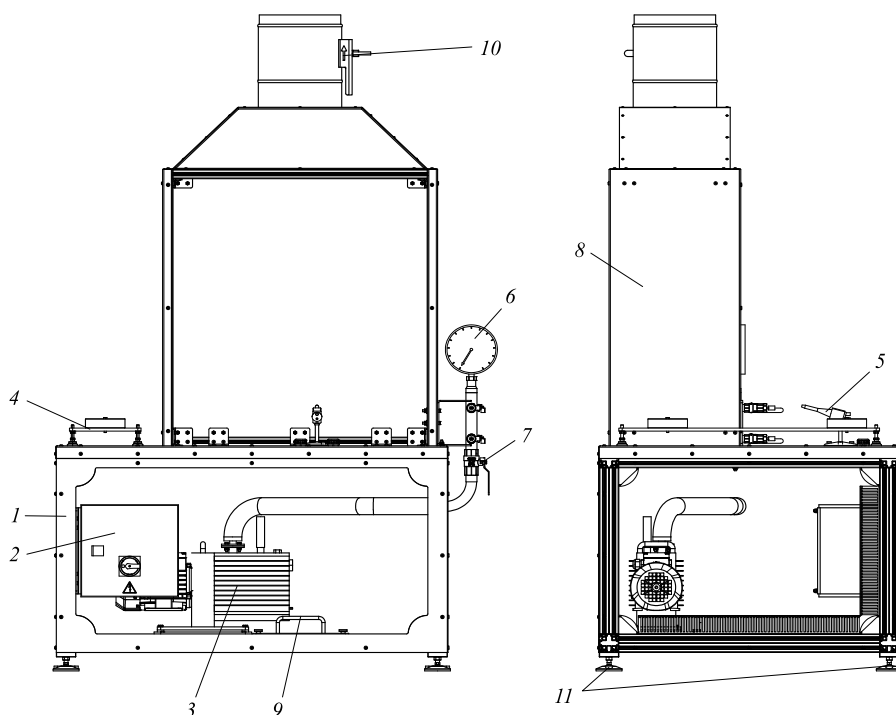


Рис. 1. Кварцеводувный стол:

1 — стол; 2 — пульт управления; 3 — форвакуумный насос; 4 — калибр; 5 — горелка; 6 — мановакуумметр; 7 — газовый кран (G1); 8 — экран; 9 — поддон; 10 — воздушный клапан (Ø250 мм); 11 — регулируемые опоры

тяжной вентиляции. Оценка натекания откачанной колбы осуществляется с помощью мановакуумметра 6. Газовый кран 7 предназначен для отсекаания кварцевой колбы от форвакуумного насоса 3. В нижней части стола установлен съёмный поддон 9, который предназначен для предотвращения разлива масла при его аварийной утечке из форвакуумного насоса.

Основные технические характеристики форвакуумного насоса

Тип насоса	2 НВР-5ДМ
Напряжение питания, В	380
Частота питающего напряжения, Гц	50
Потребляемая мощность, Вт	550
Подача, л/с	5,5
Остаточное давление, Па	2,6
Частота вращения ротора, об/мин	1430
Количество рабочей жидкости, заливаемой в насос, л	1,2
Масса без учёта рабочей жидкости, кг	26
Габаритные размеры, мм	555 × 170 × 280

Пульт управления (рис. 2) представляет собой корпус 1, на дверце 2 которого установлены главный выключатель 3 для подачи/отключения питания пульта управления; кнопка с подсветкой «ПУСК» 4 для включения форвакуумного насоса; кнопка с подсветкой «СТОП» 5 для выключения форвакуумного насоса.

На верхней панели корпуса пульта установлена розетка 6 для питания внешних устройств.

На нижней панели корпуса пульта управления расположены кабельные вводы 7 для подвода/отвода кабелей.

Внутри пульта управления установлена монтажная панель 8, на которой расположены элементы системы контроля и управления оборудованием кварцеводувного стола и элементы силовой коммутации.

Для заземления пульта управления используются шпильки заземления 13, установленные на корпусе пульта и на монтажной панели.

Сборка кварцеводувного стола и монтаж оборудования

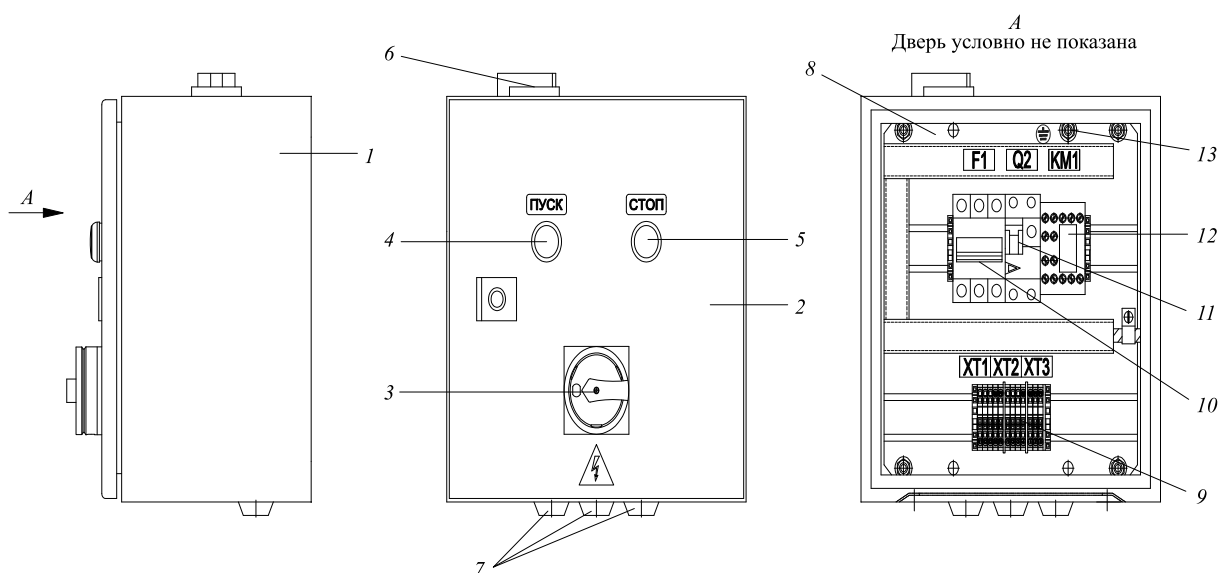


Рис. 2. Пульт управления:

1 — корпус; 2 — дверца; 3 — главный выключатель; 4 — кнопка с подсветкой «ПУСК» (зелёная); 5 — кнопка с подсветкой «СТОП» (красная); 6 — розетка (~220В, 16А); 7 — кабельные вводы; 8 — монтажная панель; 9 — блок клеммных зажимов; 10 — автоматический выключатель; 11 — дифференциальный выключатель; 12 — контактор; 13 — шпилька заземления

осуществляются следующим образом. Устанавливается стол. При этом строительным уровнем проверяется горизонтальность его размещения. Расположение стола при необходимости регулируется с помощью регулируемых опор 11 (см. рис. 1). Подсоединяется воздушный клапан 10 (см. рис. 1) к воздухопроводу существующей системы вентиляции. На передней панели стола закрепляется пульт управления. В нижней части стола устанавливается форвакуумный насос и подключается к мановакуумметру 6 (см. рис. 1). Подключается горелка к магистралям природного газа и кислорода. К пульта управления подключается пятипроводный кабель питания напряжением 380 В, частотой 50 Гц. Подсоединяются кабели к форвакуумному насосу.

Работу на кварцевом столе необходимо производить в следующем порядке. Открыть воздушный клапан 10 (см. рис. 1), включить главный выключатель 3 (см. рис. 2), включить горелку 5 (см. рис. 1), заглушить отверстия в кварцевой колбе, разогреть горелкой 5 кварцевую колбу в месте, на котором необходимо расположить штенгель, до получения отверстия. Разогреть отверстие в колбе и торец штенгелевочной трубки до температуры размягчения кварца и присоединить торец штенгелевочной трубки к отверстию кварцевой колбы. Надеть вакуумный шланг на штенгель и включить вакуумный насос, нажав на кнопку 4 «ПУСК» (см. рис. 2). Открыть кран 7

(см. рис. 1) и откачать колбу. Закрыть кран 7 и проконтролировать по показанию мановакуумметра отсутствие натекания. При необходимости закрыть воздушный клапан 10 (см. рис. 1). При необходимости выключить главный выключатель 3 (см. рис. 2). Для аварийного отключения питания кварцевидного стола необходимо выключить главный выключатель 3 пульта управления. При необходимости следует перекрыть подачу газов.

К работе с горелкой допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности, имеющие допуск к работе с газами и прошедшие курс обучения работе с газовыми горелками. Эксплуатировать горелку следует только при включенной вентиляции.

Технические характеристики горелок с широким и остроконечным пламенем

Топливная рабочая среда	Метан (природный газ)
Давление природного газа, МПа	0,1...0,5
Давление кислорода, МПа	0,1...1,0
Расход природного газа, м ³ /ч	0,5...2,0
Расход кислорода, м ³ /ч	1,5...6,0
Температура пламени в средней зоне, °С	2500
Климатическое исполнение	УХЛ
Категория размещения	4 по ГОСТ 15150—69
Температура окружающего воздуха, °С	+1...+35
Относительная влажность окружающего воздуха при +25 °С, %	Не более 80

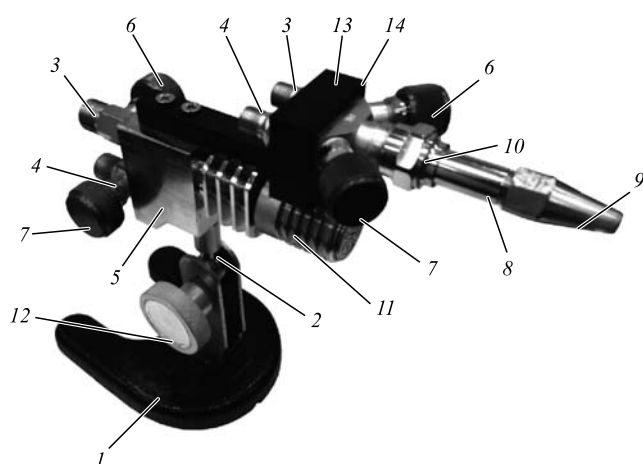


Рис. 3. Горелка:

1 — основание; 2 — шарнирная стойка; 3 — штуцер для природного газа; 4 — штуцер для кислорода; 5 — ствол нижней горелки; 6 — вентиль подачи кислорода; 7 — вентиль подачи природного газа; 8 — наконечник; 9 — мундштук; 10 — накидная гайка наконечника; 11 — головка горелки для создания широкого пламени; 12 — винт для фиксирования положения шарнирной стойки; 13 — крепление; 14 — ствол верхней горелки

Конструкция горелки (рис. 3) представляет собой две соединённых вместе горелки. Нижняя горелка закреплена на основании 1 с помощью шарнирной стойки 2, которая фиксируется винтом 12. Основание 1 может быть зафиксировано на горизонтальной поверхности с помощью крепежа. Для этого в основании 1 имеются специальные отверстия. Шарнирное соединение позволяет изменять положение горелки относительно рабочей поверхности. Шарнирная стойка 2 соединена со стволом 5 нижней горелки, к которому подсоединена головка горелки 11, предназначенная для создания широкого пламени. Также на стволе 5 первой горелки с помощью крепления 13 установлен ствол 14 верхней горелки, к которому с помощью накидной гайки 10 присоединён наконечник 8, состоящий из трубки, смесителя и съёмного мундштука 9. В смесителе происходит смешивание кислорода и природного газа. Образовавшаяся смесь движется по трубке наконечника к выходным каналам мундштука 9, на выходе из которого образовывается остроконечное пламя. На стволах 5 и 14 горелок расположены штуцера 3, предназначенные для подключения гибких шлангов подачи природного газа, и штуцера 4, предназначенные для подключения гибких шлангов подачи кислорода. Регулирование мощности пламени осуществляется с помощью вентиля управления подачей кислорода 6 и вентиля управления подачей природного газа 7.

Порядок эксплуатации горелки следующий. Перед работой необходимо убедиться в исправности оборудования и проверить герметичность подсоединения газовых шлангов, всех разъёмных и паяных соединений; тип газовых шлангов: газовые шланги должны быть типа I для природного газа и типа III для кислорода по ГОСТ 9356—75; правильность подвода кислорода и природного газа.

Затем следует установить рабочее давление газов в соответствии с техническими характеристиками горелок и технологическим процессом. Приоткрыть вентиль подачи природного газа 7 необходимой горелки и зажечь природный газ. Приоткрыть вентиль подачи кислорода 6 необходимой горелки. Отрегулировать мощность пламени с помощью вентиля 6 и 7. Выключение подачи газов следует производить в обратном порядке: закрыть вентиль кислорода 6, затем закрыть вентиль природного газа 7. Для продувки мундштука 9 или головки 11 горелки от остатков природного газа необходимо открыть на несколько секунд вентиль подачи кислорода 6. Затем закрыть вентиль 6.

Техническое обслуживание горелки заключается в следующем. В комплекс работ по техническому обслуживанию горелки входят: смазывание вентиля 6 и 7 маслом, предназначенным для смазывания газовой арматуры; затяжка накидных гаек вентиля 6 и 7 в случае их негерметичности; периодическое очищение мундштука 9 от нагара промыванием мундштука в бензине или другом растворителе (после промывки мундштука его необходимо тщательно продуть сжатым воздухом); периодическое очищение головки 11 от нагара промыванием головки в бензине или другом растворителе (после промывки головки её необходимо тщательно продуть сжатым воздухом).

При изготовлении представленного в статье оборудования применяются комплектующие ведущих мировых производителей и высококачественные материалы. Новейшие технические решения в сочетании с продуманным дизайном позволяют успешно интегрировать данное оборудование в системы комплексного автоматизированного управления.

Внедрение данного оборудования позволяет обеспечить требуемый объём производства бактерицидных ламп, обеспечивающих выполнение санитарно-эпидемиологических норм по воде и воздуху в помещениях, многократно уменьшая концентрацию микроорганизмов в воздушной среде. Это позволяет,

в свою очередь, существенно снизить заболеваемость людей, находящихся в помещениях, а также сократить количество химических препаратов, применяемых при традиционных способах дезинфекции помещений.

Библиографические ссылки

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. 136 с.

2. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. 136 с.

3. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Современные электронные системы и устройства. М.: Русайнс, 2019. 186 с.

4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Промышленная электроника. Актуальные электронные приборы, устройства, установки и системы. М.: Русайнс, 2020. 172 с.

5. **Ашрятов А.А., Микаева С.А., Микаева А.С.** Прибор для контроля сборки компактных люминесцентных ламп // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 2. С. 23—26.

6. **Железникова О.Е., Амелькина С.А., Микаева С.А., Микаева А.С.** Облучатели бактерицидные // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 11. С. 3—6.

7. **Микаева С.А., Брысин А.Н.** Электротехника. Казань: Бук, 2018. 228 с.

8. **Микаева С.А., Брысин А.Н.** Промышленная электроника. Импульсные устройства и основы микропроцессорной техники. Казань: Бук, 2019. 250 с.

9. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Промышленная электроника. Электрические машины в приборостроении. Казань: Бук, 2020. 166 с.

Ссылка для цитирования

Микаева С.А., Микаева А.С., Журавлёва Ю.А., Дюкин А.А. Кварцеводувный стол и газовая горелка // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 10. С. 462—466.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

ПРИБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU



Н.Е. Зубов, д-р техн. наук, проф., **В.Н. Рябченко**, д-р техн. наук, проф.,
А.В. Лапин, канд. техн. наук, доц.
 (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
 nikolay.zubov@rsce.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИНВАРИАНТНОГО ПО УГЛУ ТАНГАЖА УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОМ ДВИЖЕНИЕМ ВЕРТОЛЁТА

Для линеаризованной модели четвёртого порядка продольного движения одновинтового вертолётa аналитически синтезировано управление, которое обеспечивает инвариантность по углу тангажа при наличии возмущений в каналах управления, а также требуемое размещение полюсов замкнутой системы, заданных из области их устойчивости. Показаны результаты численного синтеза управления продольного движения одновинтового вертолётa с использованием аналитически синтезированных законов инвариантного управления, которые подтверждают достоверность аналитических выражений.

Ключевые слова: инвариантность; возмущения в каналах управления; МИМО-система; декомпозиция; размещение полюсов; аналитический синтез; продольное движение одновинтового вертолётa; полюса динамической системы.

The control for the linearized model of the longitudinal motion fourth order for a single-rotor helicopter is analytically synthesized which ensures the invariance of the pitch angle in the presence of disturbances in the control channels, as well as the required the poles placement of the closed-loop system, given from the region of their stability. The results of the numerical synthesis control for the longitudinal motion of a single-rotor helicopter by using analytically synthesized laws of invariant control, which confirm the reliability of the analytical expressions are shown.

Keywords: invariance; disturbances in the control channels; MIMO-system; decomposition; pole placement; analytical synthesis; longitudinal motion of a single-rotor helicopter; poles of a dynamical system.

Введение. Применение декомпозиционного метода модального управления линейными системами (pole placement, eigenvalue assignment, modal control) [1–6] позволяет осуществлять эффективный синтез законов стабилизации, в том числе аналитически, динамическими системами с многими входами и многими выходами (МИМО-системами). Современный подход к развитию методов инвариантного управления [7–9] в совокупности с декомпозиционным методом модального синтеза даёт возможность синтезировать управление, которое обеспечивает как инвариантность, так и заданное размещение полюсов. Необходимость решения задачи инвариантного управления вертолётom, как и другими динамическими системами, обусловлена потребностью повышения точности управления при возмущениях. Наряду с другими подходами к повышению точности управления, например за счёт компенсации возмущений [10], рассматриваемый подход является актуальным. В данной статье подход к синтезу

управления, включающий и инвариантность, и заданное размещение полюсов, в варианте аналитического решения рассматривается применительно к продольному движению одновинтового вертолётa (ОВ).

Математическая модель продольного движения ОВ. Будем использовать линеаризованную модель продольного движения ОВ следующего вида [8]:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{V}_x \\ \Delta \dot{V}_y \\ \Delta \dot{\omega}_z \\ \Delta \dot{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{V_x}^{V_x} & a_{V_x}^{V_y} & a_{V_x}^{\omega_z} & a_{V_x}^u \\ a_{V_y}^{V_x} & a_{V_y}^{V_y} & a_{V_y}^{\omega_z} & a_{V_y}^u \\ a_{\omega_z}^{V_x} & a_{\omega_z}^{V_y} & a_{\omega_z}^{\omega_z} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V_x \\ \Delta V_y \\ \Delta \omega_z \\ \Delta u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{V_x}^{u_x} & b_{V_x}^{u_{o.ш}} \\ b_{V_y}^{u_x} & b_{V_y}^{u_{o.ш}} \\ b_{\omega_z}^{u_x} & b_{\omega_z}^{u_{o.ш}} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_{o.ш} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где ΔV_x — отклонение продольной скорости от заданного значения; ΔV_y — отклонение вертикальной скорости от заданного значения; $\Delta \omega_z$ — отклонение угловой скорости тангажа от заданного значения; $\Delta \nu$ — отклонение угла тангажа от заданного значения; Δu_x — угол отклонения конуса несущего винта в продольном направлении; $\Delta u_{o.ш}$ — общий шаг несущего винта; $a_{V_x}^{V_x}$, $a_{V_x}^{V_y}$, $a_{V_x}^{\omega_z}$, $a_{V_x}^{\nu}$, $a_{V_y}^{V_x}$, $a_{V_y}^{V_y}$, $a_{V_y}^{\omega_z}$, $a_{V_y}^{\nu}$, $a_{\omega_z}^{V_x}$, $a_{\omega_z}^{V_y}$, $a_{\omega_z}^{\omega_z}$, $b_{V_x}^{u_x}$, $b_{V_x}^{u_{o.ш}}$, $b_{V_y}^{u_x}$, $b_{V_y}^{u_{o.ш}}$, $b_{\omega_z}^{u_x}$, $b_{\omega_z}^{u_{o.ш}}$ — коэффициенты линеаризации [11, 12].

Введём обозначения

$$\mathbf{x} = (\Delta V_x \ \Delta V_y \ \Delta \omega_z \ \Delta \nu)^T, \quad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_{o.ш} \end{pmatrix},$$

а также

$$\begin{aligned} a_{11} &= a_{V_x}^{V_x}; & a_{12} &= a_{V_x}^{V_y}; & a_{13} &= a_{V_x}^{\omega_z}; & a_{14} &= a_{V_x}^{\nu}; \\ a_{21} &= a_{V_y}^{V_x}; & a_{22} &= a_{V_y}^{V_y}; & a_{23} &= a_{V_y}^{\omega_z}; & a_{24} &= a_{V_y}^{\nu}; \\ a_{31} &= a_{\omega_z}^{V_x}; & a_{32} &= a_{\omega_z}^{V_y}; & a_{33} &= a_{\omega_z}^{\omega_z}; \\ b_{11} &= b_{V_x}^{u_x}; & b_{12} &= b_{V_x}^{u_{o.ш}}; & b_{21} &= b_{V_y}^{u_x}; & b_{22} &= b_{V_y}^{u_{o.ш}}; \\ b_{31} &= b_{\omega_z}^{u_x}; & b_{32} &= b_{\omega_z}^{u_{o.ш}}. \end{aligned}$$

Тогда вместо (1) имеем

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{u}. \quad (2)$$

Полагая, что все компоненты вектора состояния полностью наблюдаемы, синтезируем управление по тангажу, инвариантное к возмущениям в каналах управления, с заданным размещением полюсов, которые в аналитическом виде запишем так:

$$\text{eig}(A_c) = \{s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4\}, \quad (3)$$

где A_c — матрица замкнутой динамики объекта управления; s_1, \dots, s_4 — значения полюсов.

Здесь и далее заданные полюса могут принимать любые значения в соответствии с тактико-техническими требованиями.

Соответственно, матрица состояния C для инвариантного управления по тангажу имеет вид

$$C = (0 \ 0 \ 0 \ 1), \quad (4)$$

а условие инвариантности выхода у динамической МИМО-системы (2), заданной в про-

странстве состояний, относительно входного возмущения \mathbf{w}

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{u} + \mathbf{w}); \\ \mathbf{u} &= \mathbf{F}\mathbf{x}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{aligned} \quad (5)$$

где \mathbf{y} — вектор выхода; \mathbf{A} — матрица состояния объекта управления; \mathbf{B} — матрица управления; \mathbf{F} — матрица коэффициентов обратной связи, в соответствии с работой [9] имеет вид системы степенных матричных уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{C}\mathbf{B} = 0; \\ \mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{F})\mathbf{B} = 0; \\ \mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{F})^2\mathbf{B} = 0; \\ \vdots \\ \mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{F})^4\mathbf{B} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Для обеспечения условия (6) требуется найти такую матрицу \mathbf{F} , чтобы выполнялись все равенства системы (6), функционально зависящие от этой матрицы.

Аналитический синтез. В настоящей работе предлагается решение сформулированной выше задачи на основе подхода, изложенного в работе [9]. Тогда вместо системы (5) в общем случае можно рассматривать МИМО-систему вида

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{L}\mathbf{B}^T\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{w}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{u}, \end{aligned} \quad (7)$$

где \mathbf{L} — наблюдатель состояния матрицы, или в соответствии с [9] матрица инъекции Морса.

В этом случае справедлива следующая теорема [9].

Теорема. Для системы (7) при условии $\mathbf{C}\mathbf{B} = 0$ имеют место равенства

$$\mathbf{L} = \mathbf{B}^{+T}\Sigma_0 - \mathbf{A}\mathbf{B}^{+T}, \quad (8)$$

$$\mathbf{F} = \Sigma_0\mathbf{B}^+ - \mathbf{B}^+(\mathbf{A} + (\mathbf{B}^{+T}\Sigma_0 - \mathbf{A}\mathbf{B}^{+T})\mathbf{B}^T) \quad (9)$$

и выполняются условия инвариантности

$$\begin{cases} \mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{L}\mathbf{B}^T + \mathbf{B}\mathbf{F})\mathbf{B} = 0; \\ \mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{L}\mathbf{B}^T + \mathbf{B}\mathbf{F})^2\mathbf{B} = 0; \\ \mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{L}\mathbf{B}^T + \mathbf{B}\mathbf{F})^3\mathbf{B} = 0; \\ \mathbf{C}(\mathbf{A} + \mathbf{L}\mathbf{B}^T + \mathbf{B}\mathbf{F})^4\mathbf{B} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

При этом

$$\text{eig}(\mathbf{A} + \mathbf{L}\mathbf{B}^T + \mathbf{B}\mathbf{F}) \supset \text{eig}(\Sigma_0), \quad (11)$$

где Σ_0 — матрица, определяющая спектральные свойства замкнутой системы [9].

Условие (11) можно назвать спектральным условием, поскольку оно определяет спектральные свойства замкнутой системы. На фигурирующую в соотношениях (8), (9) матрицу Σ_0 могут накладываться различные условия в зависимости от дополнительных требований. Например, это может быть требование устойчивости, устойчивости с заданным запасом и др.

Проверим выполнение первого условия из (6):

$$CB = 0.$$

Одновременно с этим условием для выражений (10) справедливы неравенства

$$CAB \neq 0; CA^2B \neq 0; CA^3B \neq 0; CA^4B \neq 0.$$

Для матрицы управления B вычислим псевдообратную матрицу

$$B^+ = \begin{pmatrix} b_p^{11} & b_p^{12} & b_p^{13} & 0 \\ b_p^{21} & b_p^{22} & b_p^{23} & 0 \end{pmatrix}.$$

Компоненты данной матрицы при введении обозначения

$$\Delta_b = b_{11}^2 b_{22}^2 + b_{11}^2 b_{32}^2 - 2b_{11} b_{12} b_{21} b_{22} - 2b_{11} b_{12} b_{31} b_{32} + b_{12}^2 b_{21}^2 + b_{12}^2 b_{31}^2 + b_{21}^2 b_{32}^2 - 2b_{21} b_{22} b_{31} b_{32} + b_{22} b_{31}^2$$

записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} b_p^{11} &= (b_{11} b_{22}^2 - b_{12} b_{21} b_{22} + b_{11} b_{32}^2 - b_{12} b_{31} b_{32}) / \Delta_b; \\ b_p^{12} &= (b_{21} b_{12}^2 - b_{11} b_{22} b_{12} + b_{21} b_{32}^2 - b_{22} b_{31} b_{32}) / \Delta_b; \\ b_p^{13} &= (b_{31} b_{12}^2 - b_{11} b_{32} b_{12} + b_{31} b_{22}^2 - b_{21} b_{32} b_{22}) / \Delta_b; \\ b_p^{21} &= (b_{12} b_{21}^2 - b_{11} b_{22} b_{21} + b_{12} b_{31}^2 - b_{11} b_{32} b_{31}) / \Delta_b; \\ b_p^{22} &= (b_{22} b_{11}^2 - b_{12} b_{21} b_{11} + b_{22} b_{31}^2 - b_{21} b_{32} b_{31}) / \Delta_b; \\ b_p^{23} &= (b_{32} b_{11}^2 - b_{12} b_{31} b_{11} + b_{32} b_{21}^2 - b_{22} b_{31} b_{21}) / \Delta_b. \end{aligned}$$

С учётом соблюдения условия (3) назначим матрицу Σ_0 в следующем диагональном виде:

$$\Sigma_0 = \text{diag}(s_1, s_2).$$

В соответствии с выражением (9) вычислим матрицу обратной связи:

$$F = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Здесь

$$k_{11} = b_{11}^p s_1 + b_{11}^p (b_{11} (a_{11} b_{11}^p + a_{12} b_{12}^p + a_{13} b_{13}^p - b_{11}^p s_1) - a_{11} + b_{12} (a_{11} b_{21}^p + a_{12} b_{22}^p + a_{13} b_{23}^p - b_{21}^p s_2)) +$$

$$\begin{aligned} &+ b_{12}^p (b_{11} (a_{21} b_{11}^p + a_{22} b_{12}^p + a_{23} b_{13}^p - b_{12}^p s_1) - a_{21} + b_{12} (a_{21} b_{21}^p + a_{22} b_{22}^p + a_{23} b_{23}^p - b_{22}^p s_2)) + \\ &+ b_{13}^p (b_{11} (a_{31} b_{11}^p + a_{32} b_{12}^p + a_{33} b_{13}^p - b_{13}^p s_1) - a_{31} + b_{12} (a_{31} b_{21}^p + a_{32} b_{22}^p + a_{33} b_{23}^p - b_{23}^p s_2)); \\ k_{12} &= b_{12}^p s_1 + b_{11}^p (b_{21} (a_{11} b_{11}^p + a_{12} b_{12}^p + a_{13} b_{13}^p - b_{11}^p s_1) - a_{12} + b_{22} (a_{11} b_{21}^p + a_{12} b_{22}^p + a_{13} b_{23}^p - b_{21}^p s_2)) + \\ &+ b_{12}^p (b_{21} (a_{21} b_{11}^p + a_{22} b_{12}^p + a_{23} b_{13}^p - b_{12}^p s_1) - a_{22} + b_{22} (a_{21} b_{21}^p + a_{22} b_{22}^p + a_{23} b_{23}^p - b_{22}^p s_2)) + \\ &+ b_{13}^p (b_{21} (a_{31} b_{11}^p + a_{32} b_{12}^p + a_{33} b_{13}^p - b_{13}^p s_1) - a_{32} + b_{22} (a_{31} b_{21}^p + a_{32} b_{22}^p + a_{33} b_{23}^p - b_{23}^p s_2)); \\ k_{13} &= b_{13}^p s_1 + b_{11}^p (b_{31} (a_{11} b_{11}^p + a_{12} b_{12}^p + a_{13} b_{13}^p - b_{11}^p s_1) - a_{13} + b_{32} (a_{11} b_{21}^p + a_{12} b_{22}^p + a_{13} b_{23}^p - b_{21}^p s_2)) + \\ &+ b_{12}^p (b_{31} (a_{21} b_{11}^p + a_{22} b_{12}^p + a_{23} b_{13}^p - b_{12}^p s_1) - a_{23} + b_{32} (a_{21} b_{21}^p + a_{22} b_{22}^p + a_{23} b_{23}^p - b_{22}^p s_2)) + \\ &+ b_{13}^p (b_{31} (a_{31} b_{11}^p + a_{32} b_{12}^p + a_{33} b_{13}^p - b_{13}^p s_1) - a_{33} + b_{32} (a_{31} b_{21}^p + a_{32} b_{22}^p + a_{33} b_{23}^p - b_{23}^p s_2)); \\ k_{14} &= -a_{14} b_{11}^p - a_{24} b_{12}^p; \\ k_{21} &= b_{21}^p s_2 + b_{21}^p (b_{11} (a_{11} b_{11}^p + a_{12} b_{12}^p + a_{13} b_{13}^p - b_{11}^p s_1) - a_{11} + b_{12} (a_{11} b_{21}^p + a_{12} b_{22}^p + a_{13} b_{23}^p - b_{21}^p s_2)) + \\ &+ b_{22}^p (b_{11} (a_{21} b_{11}^p + a_{22} b_{12}^p + a_{23} b_{13}^p - b_{12}^p s_1) - a_{21} + b_{12} (a_{21} b_{21}^p + a_{22} b_{22}^p + a_{23} b_{23}^p - b_{22}^p s_2)) + \\ &+ b_{23}^p (b_{11} (a_{31} b_{11}^p + a_{32} b_{12}^p + a_{33} b_{13}^p - b_{13}^p s_1) - a_{31} + b_{12} (a_{31} b_{21}^p + a_{32} b_{22}^p + a_{33} b_{23}^p - b_{23}^p s_2)); \\ k_{22} &= b_{22}^p s_2 + b_{21}^p (b_{21} (a_{11} b_{11}^p + a_{12} b_{12}^p + a_{13} b_{13}^p - b_{11}^p s_1) - a_{12} + b_{22} (a_{11} b_{21}^p + a_{12} b_{22}^p + a_{13} b_{23}^p - b_{21}^p s_2)) + \\ &+ b_{22}^p (b_{21} (a_{21} b_{11}^p + a_{22} b_{12}^p + a_{23} b_{13}^p - b_{12}^p s_1) - a_{22} + b_{22} (a_{21} b_{21}^p + a_{22} b_{22}^p + a_{23} b_{23}^p - b_{22}^p s_2)) + \\ &+ b_{23}^p (b_{21} (a_{31} b_{11}^p + a_{32} b_{12}^p + a_{33} b_{13}^p - b_{13}^p s_1) - a_{32} + b_{22} (a_{31} b_{21}^p + a_{32} b_{22}^p + a_{33} b_{23}^p - b_{23}^p s_2)); \\ k_{23} &= b_{23}^p s_2 + b_{21}^p (b_{31} (a_{11} b_{11}^p + a_{12} b_{12}^p + a_{13} b_{13}^p - b_{11}^p s_1) - a_{13} + b_{32} (a_{11} b_{21}^p + a_{12} b_{22}^p + a_{13} b_{23}^p - b_{21}^p s_2)) + \\ &+ b_{22}^p (b_{31} (a_{21} b_{11}^p + a_{22} b_{12}^p + a_{23} b_{13}^p - b_{12}^p s_1) - a_{23} + b_{32} (a_{21} b_{21}^p + a_{22} b_{22}^p + a_{23} b_{23}^p - b_{22}^p s_2)) + \\ &+ b_{23}^p (b_{31} (a_{31} b_{11}^p + a_{32} b_{12}^p + a_{33} b_{13}^p - b_{13}^p s_1) - a_{33} + b_{32} (a_{31} b_{21}^p + a_{32} b_{22}^p + a_{33} b_{23}^p - b_{23}^p s_2)); \\ k_{24} &= -a_{14} b_{21}^p - a_{24} b_{22}^p. \end{aligned}$$

Используя соотношение (8), найдем матрицу инъекции Морса [9]:

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} b_{11}^p s_1 - a_{12} b_{12}^p - a_{13} b_{13}^p - a_{11} b_{11}^p & b_{21}^p s_2 - a_{12} b_{22}^p - a_{13} b_{23}^p - a_{11} b_{21}^p \\ b_{12}^p s_1 - a_{22} b_{12}^p - a_{23} b_{13}^p - a_{21} b_{11}^p & b_{22}^p s_2 - a_{22} b_{22}^p - a_{23} b_{23}^p - a_{21} b_{21}^p \\ b_{13}^p s_1 - a_{32} b_{12}^p - a_{33} b_{13}^p - a_{31} b_{11}^p & b_{23}^p s_2 - a_{32} b_{22}^p - a_{33} b_{23}^p - a_{31} b_{21}^p \\ & -b_{13}^p & & -b_{23}^p \end{pmatrix}. \quad (13)$$

В результате матрица замкнутой системы ОВ $\mathbf{A}_c = \mathbf{A} + \mathbf{L}\mathbf{B}^T + \mathbf{B}\mathbf{F}$ принимает следующий вид:

$$\mathbf{A}_c = \begin{pmatrix} a_{11}^c & a_{12}^c & a_{13}^c & a_{14}^c \\ a_{21}^c & a_{22}^c & a_{23}^c & a_{24}^c \\ a_{31}^c & a_{32}^c & a_{33}^c & a_{34}^c \\ a_{41}^c & a_{42}^c & a_{43}^c & 0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Её компоненты записываются так:

$$\begin{aligned} a_{11}^c &= a_{11} + b_{11}k_{11} + b_{12}k_{21} - \\ &- b_{11}(a_{11}b_{11}^p + a_{12}b_{12}^p + a_{13}b_{13}^p - b_{11}^p s_1) - \\ &- b_{12}(a_{11}b_{21}^p + a_{12}b_{22}^p + a_{13}b_{23}^p - b_{21}^p s_2); \\ a_{12}^c &= a_{12} + b_{11}k_{12} + b_{12}k_{22} - \\ &- b_{21}(a_{11}b_{11}^p + a_{12}b_{12}^p + a_{13}b_{13}^p - b_{11}^p s_1) - \\ &- b_{22}(a_{11}b_{21}^p + a_{12}b_{22}^p + a_{13}b_{23}^p - b_{21}^p s_2); \\ a_{13}^c &= a_{13} + b_{11}k_{13} + b_{12}k_{23} - \\ &- b_{31}(a_{11}b_{11}^p + a_{12}b_{12}^p + a_{13}b_{13}^p - b_{11}^p s_1) - \\ &- b_{32}(a_{11}b_{21}^p + a_{12}b_{22}^p + a_{13}b_{23}^p - b_{21}^p s_2); \\ a_{14}^c &= a_{14} + b_{11}k_{14} + b_{12}k_{24}; \\ a_{21}^c &= a_{21} + b_{21}k_{11} + b_{22}k_{21} - \\ &- b_{11}(a_{21}b_{11}^p + a_{22}b_{12}^p + a_{23}b_{13}^p - b_{12}^p s_1) - \\ &- b_{12}(a_{21}b_{21}^p + a_{22}b_{22}^p + a_{23}b_{23}^p - b_{22}^p s_2); \\ a_{22}^c &= a_{22} + b_{21}k_{12} + b_{22}k_{22} - \\ &- b_{21}(a_{21}b_{11}^p + a_{22}b_{12}^p + a_{23}b_{13}^p - b_{12}^p s_1) - \\ &- b_{22}(a_{21}b_{21}^p + a_{22}b_{22}^p + a_{23}b_{23}^p - b_{22}^p s_2); \\ a_{23}^c &= a_{23} + b_{21}k_{13} + b_{22}k_{23} - \\ &- b_{31}(a_{21}b_{11}^p + a_{22}b_{12}^p + a_{23}b_{13}^p - b_{12}^p s_1) - \\ &- b_{32}(a_{21}b_{21}^p + a_{22}b_{22}^p + a_{23}b_{23}^p - b_{22}^p s_2); \\ a_{24}^c &= a_{24} + b_{21}k_{14} + b_{22}k_{24}; \\ a_{31}^c &= a_{31} + b_{31}k_{11} + b_{32}k_{21} - \\ &- b_{11}(a_{31}b_{11}^p + a_{32}b_{12}^p + a_{33}b_{13}^p - b_{13}^p s_1) - \\ &- b_{12}(a_{31}b_{21}^p + a_{32}b_{22}^p + a_{33}b_{23}^p - b_{23}^p s_2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{32}^c &= a_{32} + b_{31}k_{12} + b_{32}k_{22} - \\ &- b_{21}(a_{31}b_{11}^p + a_{32}b_{12}^p + a_{33}b_{13}^p - b_{13}^p s_1) - \\ &- b_{22}(a_{31}b_{21}^p + a_{32}b_{22}^p + a_{33}b_{23}^p - b_{23}^p s_2); \\ a_{33}^c &= a_{33} + b_{31}k_{13} + b_{32}k_{23} - \\ &- b_{31}(a_{31}b_{11}^p + a_{32}b_{12}^p + a_{33}b_{13}^p - b_{13}^p s_1) - \\ &- b_{32}(a_{31}b_{21}^p + a_{32}b_{22}^p + a_{33}b_{23}^p - b_{23}^p s_2); \\ a_{34}^c &= b_{31}k_{14} + b_{32}k_{24}; \\ a_{41}^c &= -b_{11}(b_{12}^p + b_{13}^p); \\ a_{42}^c &= -b_{22}b_{23}^p - b_{21}b_{13}^p; \\ a_{43}^c &= -b_{31}b_{13}^p - b_{32}b_{23}^p. \end{aligned}$$

Проверка условий инвариантности (10) показывает, что они выполняются. При этом собственные значения матрицы \mathbf{A}_c не соответствуют требованию размещения полюсов (3). Для разрешения данной проблемы скорректируем вторую матрицу инъекции Морса. Для этого воспользуемся декомпозиционным методом модального синтеза, который ранее многократно применялся авторами для решения различных задач синтеза [13—19].

В данном случае ММО-система будет иметь два уровня декомпозиции: нулевой и первый, для которых собственные значения состояния замкнутого объекта по уровням декомпозиции также зададим в виде скалярных матриц вида

$$\Sigma_1 = (s_3); \quad \Sigma_2 = (s_4).$$

Для первого уровня декомпозиции необходимые матрицы для расчёта наблюдателя определяются с помощью выражений [13]

$$\mathbf{A}_{c1} = (\mathbf{C}_R^\perp)^T \mathbf{A}_c \mathbf{C}_R^\perp; \quad \mathbf{C}_1 = \mathbf{C}_c \mathbf{C}_R^\perp, \quad (15)$$

где \mathbf{C}_R^\perp — правый делитель нуля матрицы \mathbf{C} .

Аналитические значения приведённых в формулах (15) матриц имеют следующий вид:

$$C_{R}^{\perp} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; A_{c1} = \begin{pmatrix} a_{22}^c & a_{23}^c & -a_{21}^c \\ a_{32}^c & a_{33}^c & -a_{31}^c \\ -a_{12}^c & -a_{13}^c & a_{11}^c \end{pmatrix};$$

$$C_{c1} = (a_{42}^c \ a_{43}^c \ -a_{41}^c).$$

Скорректированная матрица инъекции Морса может быть вычислена по формулам

$$\widehat{L} = C^{-\Sigma_1} - A_c C^{-}; \tag{16}$$

$$C^{-} = C^T - C_{R}^{\perp}(C_1^{+\Sigma_2} - A_{c1}C_1^{+}). \tag{17}$$

Здесь помимо приведённых ранее матриц из формул (15) фигурирует псевдообратная матрица

$$C_1^{+} = \begin{pmatrix} a_{42}^c / (a_{41}^{c^2} + a_{42}^{c^2} + a_{43}^{c^2}) \\ a_{43}^c / (a_{41}^{c^2} + a_{42}^{c^2} + a_{43}^{c^2}) \\ -a_{41}^c / (a_{41}^{c^2} + a_{42}^{c^2} + a_{43}^{c^2}) \end{pmatrix}.$$

В результате согласно (16), (17) при условии, что

$$\begin{aligned} l_{11}^1 &= -(a_{21}^c a_{41}^c + a_{22}^c a_{42}^c + a_{23}^c a_{43}^c - a_{42}^c s_4) / (a_{41}^{c^2} + a_{42}^{c^2} + a_{43}^{c^2}); \\ l_{21}^1 &= -(a_{31}^c a_{41}^c + a_{32}^c a_{42}^c + a_{33}^c a_{43}^c - a_{43}^c s_4) / (a_{41}^{c^2} + a_{42}^{c^2} + a_{43}^{c^2}); \\ l_{31}^1 &= (a_{11}^c a_{41}^c + a_{12}^c a_{42}^c + a_{13}^c a_{43}^c - a_{41}^c s_4) / (a_{41}^{c^2} + a_{42}^{c^2} + a_{43}^{c^2}), \end{aligned}$$

имеем

$$\begin{aligned} C^{-} &= (l_{31}^1 \ -l_{11}^1 \ -l_{21}^1 \ 1)^T, \\ \widehat{L} &= \begin{pmatrix} a_{12}^c l_{11}^1 - a_{14}^c + a_{13}^c l_{21}^1 - a_{11}^c l_{31}^1 + l_{31}^1 s_3 \\ a_{22}^c l_{11}^1 - a_{24}^c + a_{23}^c l_{21}^1 - a_{21}^c l_{31}^1 + l_{11}^1 s_3 \\ a_{32}^c l_{11}^1 - a_{34}^c + a_{33}^c l_{21}^1 - a_{31}^c l_{31}^1 + l_{21}^1 s_3 \\ s_3 + a_{42}^c l_{11}^1 - a_{41}^c l_{31}^1 + a_{43}^c l_{21}^1 \end{pmatrix}. \tag{18} \end{aligned}$$

Окончательно матрица замкнутой ММО-системы, вычисленная по формуле

$$\widehat{A}_c = A_c + \widehat{L}C$$

с учётом (16), примет вид

$$\begin{aligned} \widehat{A}_c &= \\ &= \begin{pmatrix} a_{11}^c & a_{12}^c & a_{13}^c & a_{12}^c l_{11}^1 + a_{13}^c l_{21}^1 - a_{11}^c l_{31}^1 + l_{31}^1 s_3 \\ a_{21}^c & a_{22}^c & a_{23}^c & a_{22}^c l_{11}^1 + a_{23}^c l_{21}^1 - a_{21}^c l_{31}^1 + l_{11}^1 s_3 \\ a_{31}^c & a_{32}^c & a_{33}^c & a_{32}^c l_{11}^1 + a_{33}^c l_{21}^1 - a_{31}^c l_{31}^1 + l_{21}^1 s_3 \\ a_{41}^c & a_{42}^c & a_{43}^c & s_3 + a_{42}^c l_{11}^1 - a_{41}^c l_{31}^1 + a_{43}^c l_{21}^1 \end{pmatrix}. \tag{19} \end{aligned}$$

При этом собственные значения матрицы A_c оказываются равными

$$\text{eig}(A_c) = \{s_1, \ s_2 \ s_3 \ s_4\},$$

т. е. поэлементно совпадают с множеством (3).

Окончательная проверка условий инвариантности (8) для случая $A_c = \widehat{A}_c$ также подтверждает получение требуемого результата, который заключается в выполнении условия (10).

Численное решение. Для проверки формул (12)...(19) аналитического синтеза воспользуемся числовыми значениями матриц коэффициентов следующего вида:

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} -0,0598 & -0,0233 & 0,1095 & -0,1703 \\ -0,0268 & -0,8899 & -1,2089 & -0,01792 \\ 1,5158 & -2,3207 & -2,1334 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}; \\ B &= \begin{pmatrix} -0,3050 & -0,0228 \\ -1,2874 & 2,966 \\ 28,46 & 22,304 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Назначим полюса замкнутой системы в соответствии с (3) в виде следующих значений:

$$\text{eig}(A_c) = \{-1, \ -2, \ -3, \ -4\}. \tag{20}$$

Используя аналитические выражения (12) и (13), будем иметь

$$\begin{aligned} F &= \begin{pmatrix} -0,039533 & -0,1435798 & -1,09667 & -0,03708 \\ -0,0357452 & -0,062152 & 1,398756 & 0,047258 \end{pmatrix}; \\ L &= \begin{pmatrix} 0,00282 & -0,0217 \\ 0,0529 & -0,2642 \\ -0,4100 & 0,5631 \\ -0,0261 & -0,01149 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Матрица замкнутой динамики (14)

$$\begin{aligned} A_c &= \\ &= \begin{pmatrix} -0,04639 & -0,046138 & 0,00813 & -0,160067 \\ -0,092047 & -1,741169 & -0,0345 & 0,008707 \\ -0,294354 & -5,59515 & -1,25625 & -0,00132 \\ 0,00823 & -0,0004477 & 0,00006795 & 0,0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Проверка соблюдения условий инвариантности (10) даёт положительный результат, а собственные значения

$$\text{eig}(A_c) =$$

$$= \{-1; \ -2; \ -0,0219 + 0,029i; \ -0,0219 - 0,029i\},$$

что не соответствует условию (20).

Вторая инъекция Морса, осуществлённая по методике, описанной выше, на основании применения выражения (18) с учётом, что $s_3 = -3$, $s_4 = -4$, даёт

$$\hat{A}_c = 10^3 \begin{pmatrix} -0,00004639 & -0,00004613 & 0,00000813 & -1,41655 \\ -0,000092047 & -0,001741 & -0,0000345 & 0,077057 \\ -0,00029435 & -0,005595 & -0,00125625 & -0,011695 \\ 0,000008231 & -0,0000004477 & 0,00000006795 & -0,0069561 \end{pmatrix},$$

что соответствует собственным значениям, заданным равенством (20),

$$\text{eig}(A_c) = \{-1, -2, -3, -4\}$$

и условиям инвариантности (10).

Заключение. Для линеаризованной модели изолированного продольного движения одновинтового вертолётa как ММО-системы получены аналитические выражения законов стабилизации, обеспечивающих и условия инвариантности по углу тангажа при возмущениях в каналах управления, и заданное размещение полюсов. Приведены результаты численного решения задачи управления продольным движением одновинтового вертолётa с использованием полученных аналитических соотношений.

Библиографические ссылки

1. **Dion J.M., Commault C.** Feedback decoupling of structured systems // IEEE Trans. on Automat. Contr. 1993. AC-38. P. 1132—1135.
2. **Van der Woude J.W., Murota K.** Disturbance decoupling with pole placement for structured systems; a graph theoretic approach // SIAM J. on Matr. Anal. and Appl. 1995. 16 (3). P. 922—942.
3. **Wang Q.G.** Decoupling Control. Springer-Verlag. 2003.
4. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** Матричные методы в теории и практике систем автоматического управления летательных аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 666 с.
5. **Ryabchenko V.N., Zubov N.E., Sorokin I.V., Proletarskii A.V.** Complete Pole Placement Method For Linear Mimo Systems // Mechatronics, Automation, Control. 2018. T. 19. No. 1. P. 11—18.
6. **Zubov N.E., Ryabchenko V.N., Sorokin I.V.** Synthesis Of Stabilization Laws Of A Single-Aircscrew Helicopters Lateral Motion For Lack Of Information About Its Lateral Speed: Analytical Solution // Mechatronics, Automation, Control. 2018. Vol. 19. No. 4. P. 273—281.
7. **Мисриханов М.Ш.** Инвариантное управление многомерными системами. Алгебраический подход. М.: Наука, 2007. 238 с.
8. **Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Инвариантное управление маловысот-

ным полетом одновинтового вертолётa // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 6. С. 3—8.

9. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Условия инвариантности динамической системы на основе регуляризации // ДАН. 2015. Т. 465. № 1. С. 20—23.

10. **Гаркушенко В.И., Виноградов С.С., Баракос Г.Н.** Синтез управления беспилотным вертолётom с учетом запаздывания при неопределенных внешних возмущениях // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 2. С. 19—25.

11. **Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Сорокин И.В.** Управление по выходу спектром продольного движения одновинтового вертолётa // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 2. С. 70—79.

12. **Красовский А.А., Вавилов Ю.А., Сучков А.И.** Системы автоматического управления летательных аппаратов. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1986. 480 с.

13. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Олейник А.С., Рябченко В.Н.** Оценка угловой скорости космического аппарата в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали // Вестник МГТУ. Приборостроение. 2014. № 5. С. 3—15.

14. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Пролетарский А.В.** Аналитический синтез законов управления боковым движением летательного аппарата // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 14—20.

15. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Олейник А.С., Рябченко В.Н.** Терминальное релейно-импульсное управление линейными стационарными динамическими системами // Изв. РАН. ТиСУ. 2014. № 3. С. 134—149.

16. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Управление конечными собственными значениями дескрипторной системы // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 4. С. 381—384.

17. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Стабилизация взаимосвязанных движений летательного аппарата в каналах тангаж—рысканье при отсутствии информации об угле скольжения // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 1. С. 95—105.

18. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Управление по выходу продольным движением летательного аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 5. С. 164—175.

19. **Зубов Н.Е., Лапин А.В., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** Управление по выходу спектром линейной динамической системы на основе подхода Ван-дер-Воуда // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 3. С. 260—263.

20. **Зубов Н.Е., Лапин А.В., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** Управление по выходу спектром линейной динамической системы на основе подхода Ван-дер-Воуда // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 3. С. 260—263.

Ссылка для цитирования

Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Лапин А.В. Аналитический синтез инвариантного по углу тангажа управления продольным движением вертолётa // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 10. С. 467—472. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-10-467-472.

УДК 628.974.8

Е.А. Кузнецов, Н.П. Нестеркина

(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск),

Ю.А. Журавлёва, канд. техн. наук, доц.

(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

kuznecov_ea@mail.ru

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА АРХИТЕКТУРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ФАСАДА ЗДАНИЯ «ДВОРЕЦ КУЛЬТУРЫ»

Представлен проект архитектурного освещения общественного здания, выполненный с помощью средств компьютерного моделирования осветительных установок и световых приборов. Приведён перечень программного обеспечения для выполнения светотехнического расчёта и визуализации трёхмерной сцены освещаемого объекта. На примере освещения здания «Дворец культуры» (г. Краснослободск, Республика Мордовия) последовательно рассмотрены этапы создания проекта, определены нормативные ограничения по количественным показателям, разработан эскиз проекта в ночное время суток, создана трёхмерная модель здания, подобраны световые приборы и выполнен светотехнический расчёт с последующей визуализацией сцены освещения.

Ключевые слова: световой прибор; архитектурное освещение; световое распределение; трёхмерное моделирование; осветительная установка.

The project of architectural lighting of a public building, made with the computer modeling help of lighting installations and lighting devices, was presented. The list of software for performing lighting calculations and visualization of a three-dimensional scene of an illuminated object was given. The stages of creating the project were consistently considered using the example of lighting the building «Palace of Culture» (Krasnoslobodsk, Republic of Mordovia): normative restrictions on quantitative indicators were determined, a design of the project for the night time was developed, a three-dimensional model of the building was created, lighting devices were selected and lighting calculation followed by visualization of the lighting scene was performed.

Keywords: light device; architectural lighting; light distribution; three-dimensional modeling; lighting installation.

Введение. Современные средства компьютерного моделирования осветительных установок (ОУ) и световых приборов (СП) позволяют инженерам-светотехникам моделировать и анализировать функционирование ОУ по принципу «что — если» [1]. В трёхмерной сцене освещения в режиме реального времени можно подобрать СП с оптимальной кривой силы света (КСС), изменить расположение светильников в пространстве, получить распределение яркости, соответствующее действующим светотехническим нормам [2—4]. В большинстве случаев выполнение светотехнического расчёта носит итерационный характер, поскольку достижение эстетических, количественных и качественных показателей освещения нередко связано с возвращением на предыдущие этапы.

На данное время существует большое разнообразие светотехнического программного обеспечения для проектирования ОУ, каждое

из которых имеет свои достоинства и недостатки [5].

Целью работы является создание светотехнического проекта архитектурного освещения фасада здания «Дворец культуры» (г. Краснослободск, Республика Мордовия).

Этапы проекта. Разработку проекта архитектурного освещения можно разделить на несколько этапов:

определение ограничений, которые могут быть наложены на проект (технические ограничения, связанные с невозможностью воплотить в жизнь разрабатываемый проект; нормативные ограничения по количественным показателям в соответствии с действующими светотехническими нормами; ограничения, связанные с проведением монтажных работ и последующей эксплуатацией ОУ);

создание эскиза будущей концепции освещения объекта в графическом редакторе, например, Adobe Photoshop, Adobe Illustrator

(Adobe Systems, США), CorelDraw (Corel, Канада) и т. д. Разработка эскизов позволяет создать несколько различных вариантов освещения за короткое время. На данном этапе можно быстро внести изменения в проект с учётом пожеланий заказчика (подобрать светильники с требуемым световым распределением, определить рисунки световых пятен и характер теней на различных элементах фасада и т. д.);

создание 3D-модели и расчёт светотехнической части. Данный этап является наиболее трудоёмким и дорогостоящим, поэтому он выполняется после выбора основного эскиза. На этой стадии можно сформировать данные об уровнях яркости на фасаде здания, количестве световых приборов в ОУ, удельной подсединённой мощности ОУ и в итоге получить полное представление о выбранном варианте освещения. Для разработки 3D-модели и выполнения светотехнического расчёта применяется следующее программное обеспечение: «DIALux» (DIAL, Германия), «RELUX» (Relux Informatik AG, Швейцария), «LITESTAR 4D» (OxyTech, Италия), «3Ds Max» (Autodesk, США).

Работа над эскизом в проекте освещения фасада здания «Дворец культуры» проводилась в графическом редакторе «Adobe

Photoshop». Моделирование освещения и светотехнический расчёт осуществлялись в программе «DIALux». Светотехнический расчёт в программе «DIALux» выполнен на основе метода излучательности. Создание фотореалистичного изображения достигнуто с применением встроенного дополнения «Plug-In-a POV-Ray», в основу которого входит алгоритм адаптивной трассировки лучей.

Здание «Дворец культуры», расположенное в центральной части жилой застройки г. Краснослободска (Республика Мордовия), представлено на рис. 1.

В светотехнической области, как правило, выделяются следующие приёмы архитектурного освещения:

- заливающее прожекторное освещение;
- локальное освещение;
- светящиеся фасады;
- «световая графика»;
- «световая живопись» [1].

Согласно СП 52.13330.2016 [6] здание «Дворец культуры» по норме наружного архитектурного освещения относится к А-категории городского пространства. Для данного типа сооружений установлены следующие нормы в зависимости от выбранного приёма освещения:

средняя яркость фасада — 5 кд/м^2 (заливающее освещение);

средняя яркость акцентируемого светом элемента — 15 кд/м^2 (заливающее и акцентирующее освещение);
средняя яркость — 5 кд/м^2 (локальное освещение).

Для фрагментированной подсветки, подчёркивания ритмичности структуры объекта выбран приём локального освещения. Предварительный эскиз проекта с иллюзией ночного облика здания, выполненный в графическом редакторе «Adobe Photoshop», представлен на рис. 2.

На следующем этапе проекта осуществлялась разработка трёхмерной модели здания в программе «DIALux». Во время светотехнического расчёта трёхмерной сцены с большим количеством второстепенных элементов объекта могут затрачиваться большие вычислительные мощности. Поэтому для архитектурного освещения моделируются только те элементы, которые препятствуют прямому свету от СП и вносят большой вклад в распределение излучения. 3D-модель,



Рис. 1. Фасад здания «Дворец культуры» при дневном свете



Рис. 2. Эскиз освещения фасада здания «Дворец культуры» с иллюзией ночного облика

выполненная с разумным упрощением и наименьшим количеством граней, позволяет ускорить процесс светотехнического расчёта и визуализации сцены. Также необходимо учитывать то, что при создании 3D-модели необходимо использовать материалы, близкие по фотометрическим свойствам к реальным, и контролировать ограничение коэффициента отражения поверхностей более 80 %. При импортировании фотометрических данных СП в светотехническую программу необходимо использовать фотометрические файлы (IES, LDT) только с оригинальными или аналогичными КСС. В противном случае реальное световое распределение на освещаемом объекте может существенно отличаться от полученной визуализации на компьютере.

С помощью стандартных элементов построения программы «DIALux» была выполнена 3D-модель объекта (рис. 3).

Для достижения нормативных требований СП 52.13330.2016 при локальном освещении рекомендуется использовать малогабаритные точечные или линейные СП с разрядными источниками света (натриевые лампы высокого давления, металлогалогенные лампы) в диапазоне мощностей от 20 до 150 Вт [7]. Однако в настоящее время традиционные источники света заменяются на более энергоэффективные — светодиодные [8, 9]. В связи с этим, для данного проекта были выбраны светодиодные светильники фирм iGuzzini (Италия) и Philips (Нидерланды). В таблице представлены светотехнические характеристики выбранных СП.

Типы КСС выбранных осветительных приборов представлены на рис. 4. При освещении колонн и межколонных промежутков здания применяются СП iGuzzini BA85 iRoll 65 6,2W и Philips BCP462 1xLED-HB/RGB 26,4W с концентрированной КСС (см. рис. 4, а), позволяющие осуществить эффективное освещение с ярко выраженным световым пятном на поверхности. С помощью данных СП передаётся целостность восприятия здания в ночное время и подчеркивается его ритмическая структура. Светильники iGuzzini E491 Underscore InOut 2,1W с косинусной КСС (см.



Рис. 3. 3D-модель здания «Дворец культуры»

Светотехнические характеристики световых приборов

Наименование светового прибора	Φ, лм	P, Вт	Количество, шт.
Освещение элементов фасада			
iGuzzini BA85 iRoll 65 6,2W	364	6,2	16
Philips BCP462 1xLED-HB/RGB 26,4W	570	26,4	6
Освещение арки над парадным входом			
iGuzzini E491 Underscore InOut 2,1W	71	2,1	5
Подсветка крыши			
iGuzzini E659 Underscore InOut 2,1W	70	2,1	2
iGuzzini BA97 GLIM CUBE 3,8W	127	3,8	4

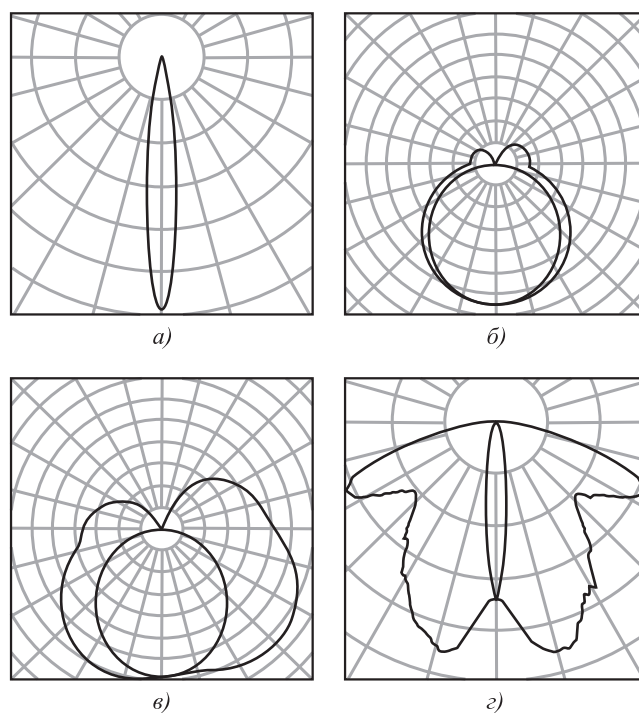


Рис. 4. Типы КСС осветительных приборов:

а — iGuzzini BA85 iRoll 65 6,2W и Philips BCP462 1xLED-HB/RGB 26,4W; б — iGuzzini E491 Underscore InOut 2,1W; в — iGuzzini E659 Underscore InOut 2,1W; г — iGuzzini BA97 GLIM CUBE 3,8W



Рис. 5. Уровни распределения яркости на поверхностях фасада здания



Рис. 6. Трёхмерная визуализация освещения здания «Дворец культуры» (г. Краснослободск)

рис. 4, б) имеют угол излучения 120° и применяются для достижения рассеянного света и минимизации светового пятна на освещаемой поверхности арки, расположенной над парадным входом. Для подсветки крыши были выбраны СП iGuzzini E659 Underscore InOut 2,1W с асимметричным распределением светового потока (см. рис. 4, в), поскольку данные светильники оказались наиболее оптимальными при их установке на расстоянии и под определённым углом по отношению к освещаемой поверхности. КСС iGuzzini BA97 GLIM CUBE 3,8W (см. рис. 4, г) имеет узкую концентрированную диаграмму направленности в продольной плоскости и широкую в поперечной. Такое световое распределение использовано в подсветке узких и протяжённых элементов фасада здания.

После проведения светотехнического расчёта в программе «DIALux» были получены уровни распределения яркости на поверхностях фасада здания, удовлетворяющие нормам СП 52.13330.2016 (рис. 5), и трёхмерная визуализация сцены освещения (рис. 6).

Заключение. Использование современных программ светотехнического расчёта и моделирования при выполнении проектов архитектурного освещения позволяет инженерам-светотехникам не только выполнять расчёт дискретного распределения яркости на освещаемой

поверхности, но и получать фото-реалистичные изображения трёхмерной сцены освещаемого объекта. Таким образом, на примере освещения здания «Дворец культуры» в г. Краснослободск были последовательно рассмотрены этапы создания проекта, а именно, определены нормативные ограничения по количественным показателям, разработан эскиз проекта в ночное время суток, создана трёхмерная модель здания, подобраны СП и выполнен светотехнический расчёт с последующей визуализацией сцены освещения.

Библиографические ссылки

1. **Справочная** книга по светотехнике / под. ред. Ю.Б. Айзенберга, Г.В. Бооса. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Светотехника, 2019. 892 с.
2. **Амелькина С.А., Дупленкова К.А., Микаева С.А.** Разработка энергоэффективных проектов освещения с использованием автоматизированного проектирования // Автоматизация. Современные технологии. 2021. № 1. С. 16—20.
3. **Habel J., Zack P.** The present and future of Lighting Engineering // Light & Engineering. 2012. No. 2. P. 5—11.
4. **Перова Н.С.** О современном архитектурном освещении // Светотехника. 2007. № 4. С. 26—27.
5. **Амелькина С.А., Халиков М.М., Микаева С.А.** Анализ программ компьютерного моделирования освещения // Автоматизация. Современные технологии. 2019. № 4. С. 163—168.
6. **СП 52.13330.2016.** Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95; введ. 2017. М.: НИИСФ РААСН и ООО «ЦЕРПА-ЭКСПЕРТ», 2016. 135 с.
7. **Vdovin V.G., Vdovina N.A.** Soffit metal-halogen lamps of 70, 100 and 150 W power for colour decorative and architectural illumination // Light & Engineering. 2009. No. 3. P. 37—42.
8. **Железникова О.Е., Синецына Л.В., Амелькина С.А., Микаева С.А.** Исследования и практические рекомендации по применению систем освещения со светодиодными источниками света // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 3. С. 45—48.
9. **Amelkina S.A., Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V.** On the efficiency of lighting by leds in visual work // Light & Engineering. 2018. No. 3. P. 81—87.

Ссылка для цитирования

Кузнецов Е.А., Нестеркина Н.П., Журавлёва Ю.А. Разработка проекта архитектурного освещения фасада здания «Дворец культуры» // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 10. С. 473—476.

УДК 537.86

Н.Г. Джавадов, д-р техн. наук, проф., **Х.Г. Асадов**, д-р техн. наук, проф., **Р.В. Казымлы**
(Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика)

asadzade@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОСЛАБЛЕНИЕ РАДИОСИГНАЛА В АТМОСФЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Статья посвящена оценке влияния метеорологических факторов на ослабление радиосигнала в атмосферных распределённых сетях передачи информации. На основе результатов известных экспериментальных исследований влияния таких метеофакторов, как давление, температура и относительная влажность, составлена математическая модель для оценки суммарного ослабления силы радиосигнала. Дана количественная оценка суммарному ослаблению радиосигнала.

Ключевые слова: передача информации; радиосигнал; затухание сигнала; метеорологический фактор; атмосфера.

The article is devoted to the assessment of the influence of meteorological factors on the attenuation of the radio signal in atmospheric distributed information transmission networks. The mathematical model was made to assess the total attenuation of the strength of the radio signal based on the results of well-known experimental studies of the influence such meteorological factors as pressure, temperature and relative humidity. A quantitative assessment of the total attenuation of the radio signal is given.

Keywords: information transfer; radio signal; attenuation of the signal; meteorological factor; atmosphere.

Введение. Хорошо известно, что в беспроводных атмосферных распределённых сетях локализации с помощью беспроводных сетей для нахождения связи между расстоянием и силой принятого радиосигнала используется путевой показатель потерь (path loss exponent) [1, 2]. Вместе с тем, как отмечается в работе [1], на результаты проводимой локации оказывают влияние метеорологические показатели окружающей среды. Для уменьшения погрешности результатов локации предлагается комбинирование метода трилатерации и метода вычисления с учётом ослабления радиосигнала. Однако латерационный метод предусматривает использование результатов измерений по трассам, направленным по разным азимутальным углам, что при наличии направленных ветров также не позволяет избежать погрешностей проводимой локации. Отсюда следует вывод о том, что влияние атмосферных факторов на степень ослабления используемых радиосигналов должно быть досконально изучено.

Основные метеорологические факторы, влияющие на силу радиосигнала. Согласно работе [3] основными метеорологическими факторами, влияющими на силу радиосигнала в распределённых сетях передачи информации, являются температура, давление, влажность, скорость и направленность ветра. Как отме-

чается в работе [3], ветер является широко-массштабным потоком передвижения газов, т. е. массивным движением воздуха. Ветер появляется из-за различия в атмосферном давлении и направлен с места с высоким давлением в место с низким давлением.

Согласно работе [4] из-за влияния ветра ослабление радиосигнала в атмосферном канале может возрастать. Экспериментальные исследования [5—7] показали наличие сильной положительной корреляции между скоростью ветра и силой радиосигнала на частотах 2,4; 5 и 5,8 ГГц. Вместе с тем исследования, проведённые в работе [5], показали, что корреляция между силой радиосигнала и скоростью ветра является неоднозначной: при сухом сезоне эта корреляция положительна (рис. 1), а при влажном сезоне — отрицательная (рис. 2).

Вместе с тем, как было отмечено ранее, ветер появляется из-за наличия разницы давлений на разных участках атмосферы и существуют соответствующие статистические модели взаимосвязи давления P и скорости ветра W . Например, согласно работе [8]

$$a_1W + a_2W^2 + a_3P = 1, \quad (1)$$

где $a_1 = 0,00356$; $a_2 = 2,56 \cdot 10^{-6}$; $a_3 = 0,000985$.

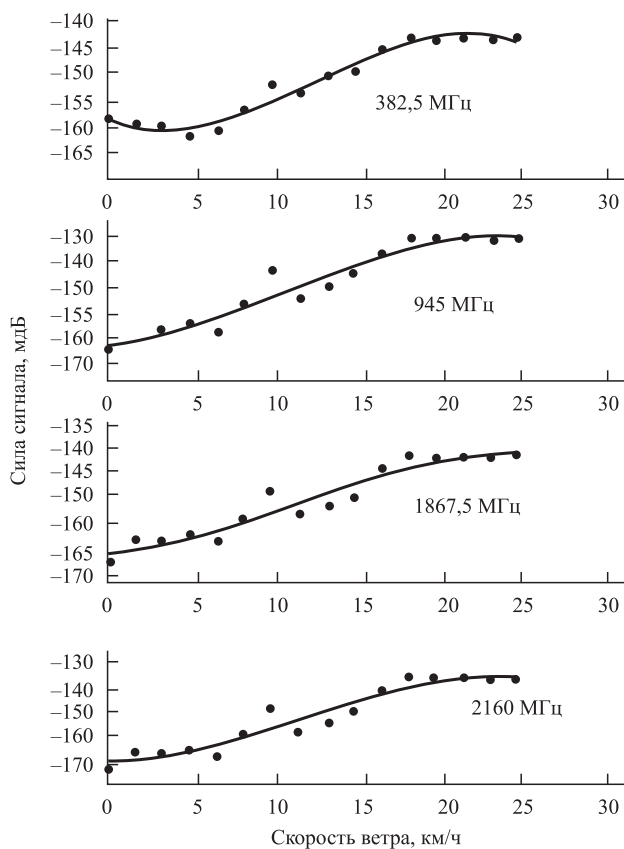


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований зависимости силы радиосигнала от скорости ветра при сухом сезоне для разных частот [5]

В работе [9] приведена зависимость

$$W_{\max} = 3,4(1010 - MSLP)^{0,644}, \quad (2)$$

где $MSLP$ — минимальное значение давления на уровне моря; W_{\max} — максимальная скорость ветра.

Целью настоящей статьи является построение эмпирической модели зависимости силы радиосигнала от таких метеорологических факторов, как давление P , температура T , относительная влажность RH и скорость ветра W .

Предлагаемый метод. Приведённый обзор влияния метеорологических факторов на силу радиосигнала и взаимосвязь метеорологических параметров позволяют сделать следующие выводы. Среди метеорологических факторов P , T , RH и W относительно независимыми можно считать P , T и RH . При этом W однозначно определяется с помощью выражений (1), (2), а влияние этого фактора на силу радиосигнала зависит от направленности ветра, радиосигнала и характера сезона (сухой или влажный).

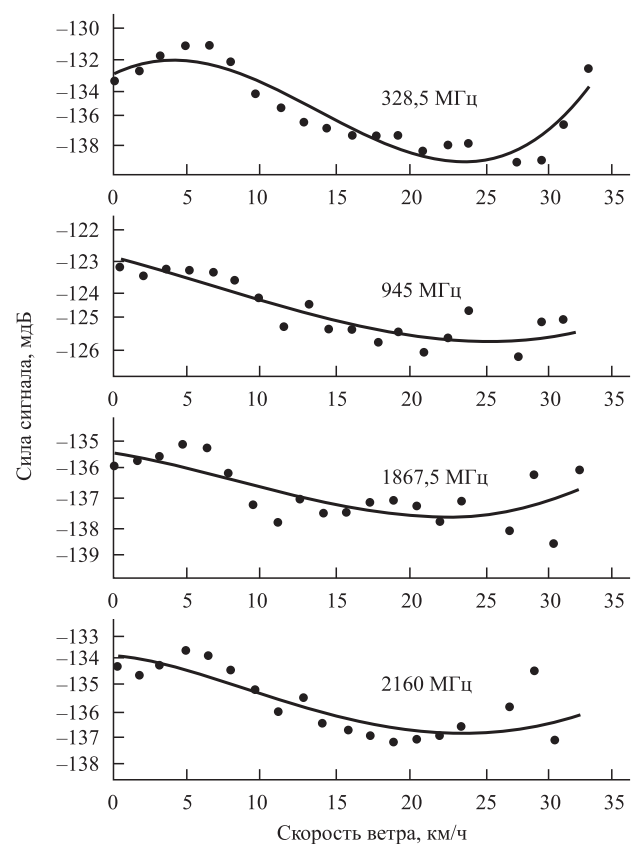


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований зависимости силы радиосигнала от скорости ветра при влажном сезоне для разных частот [5]

С учётом изложенного предлагается следующая модель оценки влияния метеорологических факторов на силу радиосигнала RSS :

$$RSS(t + \Delta t) = RSS(t)k_w(P, RH, \varphi), \quad (3)$$

где $k_w(P, RH, \varphi)$ — коэффициент ослабления радиосигнала, зависящий от P , RH и φ ; φ — угол между направлением ветра и направлением распространения радиосигнала.

Запишем полную производную RSS по времени t :

$$\frac{d(RSS)}{dt} = \frac{\partial(RSS)}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial(RSS)}{\partial(RH)} \frac{d(RH)}{dt} + \frac{\partial(RSS)}{\partial P} \frac{dP}{dt}, \quad (4)$$

откуда

$$d(RSS) = \frac{\partial(RSS)dT}{\partial T} + \frac{\partial(RSS)d(RH)}{\partial(RH)} + \frac{\partial(RSS)dP}{\partial P}, \quad (5)$$

где $\frac{\partial(RSS)}{\partial T}$, $\frac{\partial(RSS)}{\partial(RH)}$, $\frac{\partial(RSS)}{\partial P}$ — частные производные RSS соответственно по T , RH и P .

Следует отметить, что указанные частные производные должны быть экспериментально определены при неизменных значениях других аргументов. Соответствующие исследования были проведены в работе [10].

Второй множитель в правой части предлагаемой модели (3) определяется следующим образом:

$$k_w(P, RH, \varphi) = k_{1w}(P)k_{2w}(RH)k_{3w}(\varphi), \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} k_{1w}(P) &= A_1 - C_1P; \quad A_1, C_1 = \text{const}; \\ k_{2w}(RH) &= A_2 - WC_2; \quad A_2, C_2 = \text{const}; \\ k_{3w}(\varphi) &= A_3 + WC_3; \quad A_3, C_3 = \text{const}. \end{aligned} \quad (7)$$

Модельные исследования. На рис. 3—5 приведены результаты экспериментальных исследований [10], позволяющие вычислить $\frac{\partial(RSS)}{\partial T}$, $\frac{\partial(RSS)}{\partial(RH)}$ и $\frac{\partial(RSS)}{\partial P}$.

Проведём вычисление в RSS в соответствии с графиками, приведёнными на рис. 3—5.

В соответствии с рис. 3 получим

$$\frac{\partial(RSS)}{\partial T} = \frac{1,4}{2 \text{ } ^\circ\text{F}} = 0,7 \frac{\text{мдБ}}{^\circ\text{F}}. \quad (8)$$

В соответствии с рис. 4 получим

$$\frac{\partial(RSS)}{\partial(RH)} = \frac{0,8 \text{ мдБ}}{10 \% RH} = 0,08 \frac{\text{мдБ}}{\% RH}. \quad (9)$$

В соответствии с рис. 5 получим

$$\frac{\partial(RSS)}{\partial P} = \frac{0,54 \text{ мдБ}}{0,1 \text{ см рт. ст.}} = 5,40 \frac{\text{мдБ}}{\text{см рт. ст.}}. \quad (10)$$

Условно приняв $\partial T = dT$; $\partial(RH) = d(RH)$; $\partial P = dP$, получим $d(RSS) = 6,18 \text{ мдБ}$.

Далее, условно приняв $k_{1w}(P) = k_{2w}(RH) = 0,9$; $k_{3w}(\varphi) = 1$, получим $k_w(P, RH, \varphi) = 0,81$.

На основе соотношения (3) найдём разность

$$\Delta(RSS) = RSS(t + \Delta t) - RSS(t). \quad (11)$$

Из выражений (3) и (11) получим

$$\Delta(RSS) = RSS(t)[k_w(P, RH, \varphi) - 1]. \quad (12)$$

Вычислим относительный коэффициент ослабления сигнала:

$$\gamma = \frac{|\Delta(RSS)|}{RSS(t)} = k_w(P, RH, \varphi) - 1. \quad (13)$$

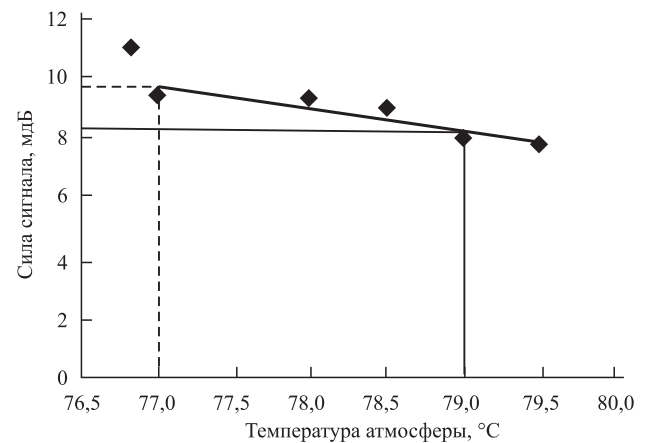


Рис. 3. Зависимость силы радиосигнала от температуры атмосферы

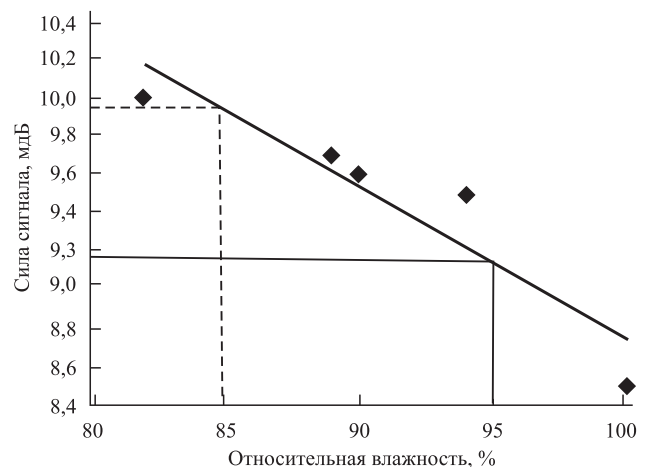


Рис. 4. Зависимость силы радиосигнала от относительной влажности атмосферы

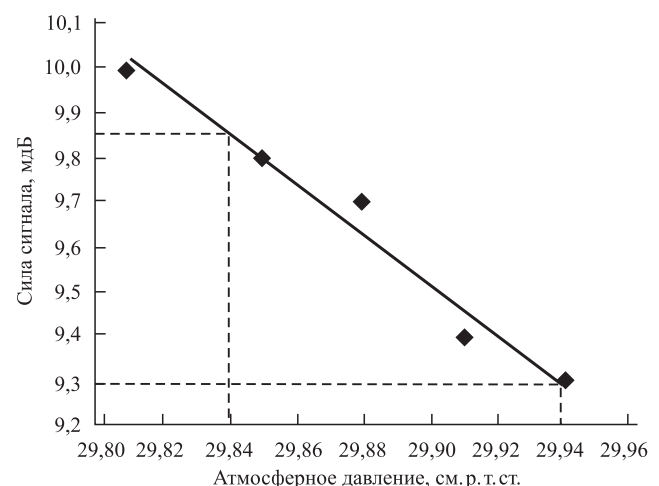


Рис. 5. Зависимость силы радиосигнала от атмосферного давления

С учётом полученных ранее значений $k_w(P, RH, \varphi) = 0,81$; $d(RSS) = 6,18$ мдБ получим

$$\gamma = |1 - 0,81| = 0,19. \quad (14)$$

Таким образом, согласно принятой модели (3), относительный коэффициент ослабления сигнала зависит от текущего значения силы радиосигнала $RSS(t)$ и определяется такими метеорологическими факторами, как T , RH и P .

Заключение. Исследовано влияние метеорологических факторов на ослабление силы радиосигнала. На основе результатов известных экспериментальных исследований влияния метеофакторов: давления, температуры и относительной влажности составлена математическая модель для оценки суммарного ослабления силы радиосигнала. Дана количественная оценка суммарного ослабления радиосигнала.

Библиографические ссылки

1. Pu C.C., Ooi P.C., Chung W.Y. Accuracy and stability of path loss exponent measurement for localization in wireless sensor network // Intern. J. of Digital Content Technology and its Applications (JDCTA). April 2013. Vol. 7. No. 7. 136 p. DOI: 10.4156/jdcta.vol7.issue7.
2. Miranda J., Abrishambaf R., Gomes T., Gonçalves P., Cabral J., Tavares A., Monteiro J. Path loss exponent analysis in wireless sensor networks: experimental evaluation // Industrial Informatics. 2013/ IEEE Intern. Const. (INDIN).
3. Joseph A., Oku D.E. Wind versus UHF radio signal // Intern. J. of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR). February 2010. Iss. 2.
4. Meng Y.S., Lee Y.H., Ng B.C. The effects of tropical weather on radio wave propagation over foliage channel // IEEE transaction on vehicular technology. 2013. Vol. 58. No. 8. P. 4023—4030.
5. Zafar S.A. N.A., Sabri N.H., Umar R., Ibrahim Z.A. Radio frequency interference on nearby radio astronomical lines: relationship between wind speed and radio signal strength measured at East Coast of Peninsular Malaysia // Sains Malaysiana. 2019. Vol. 48 (1). P. 183—189. [Электронный ресурс]. Режим работы: <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2019-4801-21> (дата обращения: 27.05.2021).
6. Bri D., Sendra S., Coll H., Lioret J. How the atmospheric variables affect to the WLAN datalink layer parameters // In telecommunications (AICT). 2010 Sixth Advanced Intern/Conf/. 2010. P. 13—18.
7. Chua T.H., Wassell I.J., Rahman T.A. Combined effects of wind speed and wind direction on received signal strength in foliated broadband fixed wireless links // Antennas and Propagation (EuCAP). 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on IEEE. 2010. P. 1—5.
8. Wooten R.D. Statistical analysis of the relationship between wind speed, pressure and temperature // J. of Applied Sciences. 2011. Vol. 11 (15). P. 2712—2722. DOI: 10.3923/jas.2011.2712.2722.
9. Choi J.W., Cha Y., Kim H.D., Lu R. Relationship between the maximum wind speed and the minimum sea level pressure for tropical cyclones in the Western North Pacific // J. of Climatology & Weather Forecasting. 2016. Vol. 4:3. DOI: 10.4172/2332-2594.1000180.
10. Amajama J. Impact of weather components on (UHF) radio signal // Intern. J. of Engineering Research and General Science. May—June 2016. Vol. 4. Iss. 3.

Ссылка для цитирования

Джавадов Н.Г., Асадов Х.Г., Казымлы Р.В. Исследование влияния метеорологических факторов на ослабление радио сигнала в атмосферных распределённых сетях передачи информации // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 10. С. 477—480.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 02.08.2021.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

Подписано в печать 08.10.2021.

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Оригинал-макет: ООО «Авансед солюшнз».

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация. Современные технологии» обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель