ISSN 1727-2769

ДОКЛАДЫ **академии наук высшей школы** Российской ФЕДЕРАЦИИ

№ 2 (59) АПРЕЛЬ-ИЮНЬ 2023

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ





Журнал публикует статьи о новых конкретных результатах законченных оригинальных и особенно имеющих приоритетный характер исследований в области инноваций, а также в области физико-математических и технических наук по группам специальностей (в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28.12.2018 № 90-р):

Физико-математические науки

- 1.3.8-Физика конденсированного состояния
- 1.3.14-Теплофизика и теоретическая теплотехника
- 2.2.13 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14 Антенны, СВЧ устройства и их технологии
- 2.2.15-Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.2.16-Радиолокация и радионавигация

Технические науки

- 1.3.8-Физика конденсированного состояния
- 1.3.11-Физика полупроводников
- 1.3.14-Теплофизика и теоретическая теплотехника
- 2.2.13 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14 Антенны, СВЧ устройства и их технологии
- 2.2.15-Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.2.16-Радиолокация и радионавигация
- 2.4.1 Теоретическая и прикладная электротехника
- 2.4.2-Электротехнические комплексы и системы

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов. Для авторов публикация является бесплатной.

Редакция журнала «Доклады АН ВШ РФ» просит авторов при подготовке статей строго соблюдать правила, доступные по адресу http://journals.nstu.ru/doklady/rules. Статьи, оформленные с нарушением правил, отклоняются без рецензирования.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2023

апрель – июнь

№ 2 (59)

Выходит четыре раза в год ISSN 1727-2769

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия) Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония) А. Загоскин, PhD (Великобритания) Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия) М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина) К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф. И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф. А.О. Давидов, д-р техн. наук Г.Н. Девятков, д-р техн. наук, проф. В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц. С.Л. Елистратов, д-р техн. наук А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф. И.Ф. Лозовский, д-р техн. наук, проф. В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф. М.И. Низовцев, д-р техн. наук, проф. О.В. Нос, д-р техн. наук, проф. В.П. Разинкин, д-р техн. наук, проф. В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф. А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф. А.Н. Сычев, д-р техн. наук, проф. С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф. С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф. В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций в 2021 г. (свидетельство ПИ № ФС 77–81374 от 30.06.2021 г.)

Адрес редакции, издателя: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 1, ком. 346, телефон: (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирский государственный технический университет, 2023 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL ACADEMY OF SCIENCES

2023

April – June

№ 2 (59)

Journal is published quarterly ISSN 1727-2769

Journal was established by Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia) D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia) A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom) E.V. Ilvichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany) M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine) K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof. A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.) G.N. Devyatkov, D.Sc. (Eng.), Prof. V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof. S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.) A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof. I.F. Lozovskiy, D.Sc. (Eng.), Prof. V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof. M.I. Nizovtsev, D.Sc. (Eng.), Prof. O.V. Nos, D.Sc. (Eng.), Prof. V.P. Razinkin, D.Sc. (Eng.), Prof. V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof. A.N. Sychev, D.Sc. (Eng.), Prof. S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof. S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof. V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor and Publisher Address: Office 346, 20 bld. 1, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Tel: +7 (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk State Technical University, 2023

апрель – июнь № 2 (59)

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ушаков И.В., Ошоров А.Д., Сафронов И.С. Физика деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического металлического сплава......7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Кромм А.А., Симаков Г.М., Гусев А.Е. Высокодинамичная компенсация «мертвого времени» в электрических приводах на базе сигнальной адаптации......16

Мокрушников П.В. Рудяк В.Я.

Механическая модель образования складок на плазматиче-	
ской мембране2	9

Устинов Д.А., Аисар А.Р.	
Исследование алгоритмов работы дистанционной защиты	
в системах распределенной генерации	41

PROCEEDINGS OF RUSSIAN HIGHER SCHOOL ACADEMY OF SCIENCES

2023 April – June № 2 (59)

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

TECHNICAL SCIENCES

Mokrushnikov P.V., Rudyak V.Ya. A mechanical model of fold formation on the plasma membrane29

Ustinov D.A., Aysar A.R.
Study of the protection algorithms in distributed
generation systems

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2023

апрель-июнь

№ 2 (59)

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ =

УДК 539.424

ФИЗИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ АМОРФНОГО И КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА

И.В. Ушаков, А.Д. Ошоров, И.С. Сафронов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

В работе исследуются физические механизмы деформирования и разрушения в области границы аморфного и кристаллического металлического сплава при низках температурах. Экспериментальные исследования проводились на композиционных образцах, образованных аморфным сплавом 82КЗХСР и сплавом ПОСК 50-18 при температурах 152 К, 219 К и 293 К. Исследована специфика изменения прочности и пластичности материала при данных температурах. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых материалов, способных работать при низких температурах. Обсуждены физические закономерности пластического деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического сплава при разных температурах.

Ключевые слова: физика деформирования, аморфный сплав, легкоплавкий сплав, композит, одноосное растяжение, низкотемпературная деформация.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-7-15

Введение

Исследование физики деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического металлического сплава представляет теоретический и практический интерес. В тонком пограничном слое между аморфным и «традиционным» поликристаллическим металлическими сплавами пластическая деформация может иметь ряд особенностей, связанных с взаимным влиянием аморфной и кристаллической структур друг на друга.

На характеристики пластического деформирования в тонком пограничном слое будет сильно влиять температура, при которой будет происходить механическое воздействие. Выполнить такие исследования при высоких температурах достаточно сложно, так как даже при незначительном повышении температуры в аморфном металлическом сплаве будут инициированы процессы структурной релаксации/кристаллизации [1–3]. Поэтому представляет интерес исследование специфики деформирования и разрушения при понижении температуры.

По мере понижения температуры происходит охрупчивание металлических сплавов. В случае кристаллической структуры эффекты охрупчивания достаточно хорошо изучены. Они зависят от типа кристаллической решетки, химического состава металлического сплава и т. д. [4–6]. По мере понижения температуры изменяется характер деформирования аморфных металлических сплавов от гомогенного к негомогенному. В аморфных металлических сплавах температурную зависимость микротвердости и напряжения течения, как и для кристаллических материалов, можно разделить на термическую и атермическую компоненты [4]. Атермическая компонента для металла зависит от химического состава и кристаллических сплавов зависит от атермической компоненты и практически не зависит от структурного химического состава.

© 2023 Ушаков И.В., Ошоров А.Д., Сафронов И.С.

Выявление физических закономерностей деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического металлического сплава позволит расширить теоретические представления о физике разрушения в таких материалах. Это позволит сформулировать условия получения композиционных соединений легкоплавких металлических сплавов с многокомпонентными аморфными металлическими сплавами.

Целью данной работы является выявление физических закономерностей деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического металлического сплава.

1. Методика эксперимента

Исследование проводилось на основе аморфной ленты марки 82КЗХСР (химический состав: 83,7 % Со + 3,7 % Fe + 3,2 % Cr + 9,4 % Si (вес. %)). Толщина аморфной ленты 30 мкм, ширина 20 мм (изготовитель – Ашинский металлургический завод). Для изготовления композитного материала спаивали две полоски аморфной ленты легкоплавким сплавом.

В ходе экспериментального поиска были апробированы различные легкоплавкие сплавы (и припои). Критерием выбора сплава была температура плавления, которая должна быть ниже температуры кристаллизации аморфного металлического сплава. В данной работе изготовили композиционный материал на основе сплавов 82КЗХСР и ПОСК 50-18 (химический состав ПОСК 50-18: 50 % Sn + 32 % Pb + 18 % Cd (вес. %)). Подготавливали две полоски аморфной ленты с толциной 30 мкм, шириной 20 мм и длиной в 100 мм. Размеры образцов приводили в соответствии с ГОСТ 1497–84 [7]. Композит подвергали сжатию в специальной конструкции, и отправляли ее на изотермический отжиг при $T = (423 \pm 5)$ °K, в течение 5 мин.

При изготовлении образцов добивались, чтобы толщина легкоплавкой составляющей была не более 200 мкм. Для испытаний выбирались образцы с одинаковой толщиной по всей длине.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В данной работе из всего многообразия металлических сплавов были выбраны легкоплавкие сплавы, так как они из-за низкой температуры кристаллизации характеризуются специфическими зависимостями микротвердости и хрупкости от температуры, а также не разрушают аморфную структуру при сплавлении с аморфной лентой. В композите могут присутствовать компоненты с ОЦК и ТПУ решетками. Кроме того, эти материалы имеют хорошую адгезию с аморфной лентой на основе кобальта [8, 9].

Механические свойства образцов, получаемых сплавлением двух пленок аморфного металлического сплава легкоплавким материалом, во многом будут определяться состоянием материала вблизи границы аморфной ленты и кристаллического сплава. Это позволит выявить физические закономерности протекания процессов деформирования и разрушения на границе таких материалов. Состояние материала в граничной области будет сильно влиять на свойства образца в целом в том случае, если толщины будут достаточно малы. Этому условию соответствуют тонкие ленты аморфного сплава (30 мкм), которые спаивались с легкоплавким сплавом, помещенным между слоями ленты.

Экспериментальные исследования были направлены на выявление физических механизмов деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического сплава с разной структурой при различных температурах. Проводили механические испытания полученных композиционных образцов путем одноосного

растяжения на разрывной машине Instron 3365. Испытания проводили при трех температурах 152 К, 219 К и 293 К. Испытания проводили по ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на разрыв» [7].

На рис. 1 показана диаграмма растяжения аморфных образцов при различных температурах.



Рис. 1 – Диаграмма растяжения аморфных образцов при температурах: a - 293 K; $\delta - 219$ K; e - 152 K *Fig.* 1 – Tensile diagram of amorphous samples at temperatures: a - 293 K; $\delta - 219$ K; e - 152 K

При 219 К среднее временное сопротивление (σ_B) падает до 1151 МПа, а среднее относительное удлинение – до 1,5 %; при 152 К среднее временное сопротивление составляет 1061 МПа, а среднее относительное удлинение 1,3 %.

На рис. 2 показана диаграмма растяжения композиционных образцов со сплавом ПОСК 50-18 при различных температурах. Временное сопротивление при 293 К в среднем равно 314 МПа, а среднее относительное удлинение составляет 2,28 %.



Рис. 2 – Диаграмма растяжения композиционных образцов аморфного металлического сплава со сплавом ПОСК 50-18 при температурах: *a* − 293 K; *b* − 219 K; *b* − 152 K



При 219 К временное сопротивление в среднем равно 240 МПа, а среднее относительное удлинение составляет 1,65 %. Временное сопротивление материала при низкой температуре составляет в среднем 234 МПа. Это означает, что материал достаточно пластичный и способен пластически деформироваться при низких температурах.

Композиционные образцы ухудшают свои пластические свойства при понижении температуры. Однако для каждой из трех температур (152 К, 219 К и 293 К), пластические свойства композита оказываются лучше, чем для аморфного образца (см. таблицу).

Сплав	Температура испытания, К	Модуль Юнга, МПа	σв, МПа	δ, %
Композит	293	16174,65	311	2,3
	219	18232,32	241	1,65
	152	16841,23	229	1,58
Аморфный сплав	293	100371,1	1436	1,65
	219	87469,31	1153	1,52
	152	86508,29	1088	1,34

Данные механических испытаний Mechanical test data

С понижением температуры до 219 К меняется характер разрушение аморфного сплава, который становится хрупким. При температуре 152 К образец разрушается хрупко. Трещины прямые, образец в зоне роста магистральной трещины/трещин разрушается на несколько частей.

При растяжении композиционного материала на основе аморфного металлического сплава 82КЗХСР и кристаллического сплава ПОСК 50-18 происходит вязкое разрушение. Охрупчивание не носит столь выраженного характера. В отличие от аморфного образца композиционный образец всегда разрушается на две части, отсутствуют мелкие «отколы». Существует большое количество ветвящихся трещин с криволинейными траекториями (рис. 3). Такой рост трещин свидетельствует о вязком разрушении, часть энергии тратится на пластическое деформирование, что повышает энергоемкость разрушения [10, 11]. Механизм роста общей «прочности» композита понятен и многократно описан [12]. Примечательно, что в данной работе отмечены следы пластического деформирования аморфной ленты, входящей в композиционное соединение. Это подтверждает, что в материале сохраняется возможность пластического деформирования даже при низких температурах.

Такое поведение материала может быть обусловлено процессами пластического деформирования, протекающими на границе между аморфным материалом и кристаллическим металлическим сплавом.

Композиционные образцы со сплавом ПОСК 50-18 имеют низкое временное сопротивление (314 МПа при 293 К, 234 МПа при 219 К и 152 К), но высокое относительное удлинение (2,28 % при 293 К, 1,5 % при 219 К и 1,54 % при 152 К). Зона перехода на границе аморфного сплава и кристаллического может обладать выраженными пластичными свойствами.

Экспериментально наблюдаемые результаты можно объяснить, если предположить, что в известной формуле, связывающей предел текучести с параметрами материала [4], происходит снижение активационного объема V на границе между двумя сплавами (за счет локального воздействия на группы атомов в микрообластях сплавления двух материалов при одноосном растяжении):

$$\sigma = \frac{U - kT \ln M / \dot{\varepsilon}}{V},\tag{1}$$

где σ – предел текучести; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; U – высота потенциального барьера для движения дислокаций; k – постоянная Больцмана; V – активационный объем, где $M \approx$ const.



Рис. 3 – Микрофотография области разрушения композиционного соединения аморфного металлического сплава со сплавом ПОСК 50-18 с ветвящейся трещиной. Стрелками указаны микротрещины

Fig. 3 – Micrograph of the fracture region of the composite compound of an amorphous metallic alloy with the alloy POCK 50-18 with a branching crack. The arrows indicate microcracks

Согласно модели пластического течения [4], «зона сдвига» может включать область от нескольких атомов до нескольких сотен атомов. В модели Спейнера предполагается, что процесс пластической деформации проявляется в виде серии атомных прыжков в области свободного/избыточного объема. В результате наблюдается эффект перемещения «свободного объема» по аморфному металлическому сплаву. Это механизм деформации диффузионного типа. В случае инициирования такого процесса на границе аморфного и кристаллического металлического сплава перемещение «свободного объема» будет сопровождаться кратковременным локальным повышением температуры. Это и будет обусловливать повышение пластических свойств аморфного сплава в условиях низкотемпературного нагружения.

Композит на основе аморфного металлического сплава и легкоплавкого сплава обладает большей относительной деформацией по сравнению с чистым аморфным металлическим сплавом и менее чувствителен к изменению температуры. Одним из возможных механизмов повышения относительной деформации композита является торможение трещин на границе аморфной и кристаллической фазы. Как следствие, будет иметь место повышение энергоемкости разрушения за счет пластической деформации в соответствии с критерием Гриффитса:

$$\sigma_{\rm KPHT} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}},\tag{2}$$

где $\sigma_{\text{крит}}$ – наименьшее напряжение растяжения, необходимое для распространения трещины как хрупкой; *E* – модуль Юнга; γ – поверхностная энергия стенок трещины, отнесенная к единице ее площади; *c* – половина длины трещины.

Улучшение пластических свойств композиционного соединения вполне объяснимо с точки зрения имеющихся представлений. На поверхности композиционных соединений (внешняя поверхность аморфной ленты) отмечается вязкое разрушение и элементы пластичности (рис. 3). Это может быть связано с тем, что в месте контакта кристаллического металлического сплава и аморфного металлического сплава при низкотемпературном одноосном растяжении будет меняться физический механизм деформирования.

Заключение

1. Одноосное растяжение композиционного материала на основе аморфного металлического сплава 82КЗХСР и кристаллического сплава ПОСК 50-18 сопровождается вязким разрушением даже при понижении температуры до 152 К. В отличие от аморфного образца охрупчивание композиционного соединения не носит столь выраженного характера. В композиционном образце существует большое количество ветвящихся трещин с криволинейными траекториями, что свидетельствует о вязком разрушении, пластическом деформировании и высокой энергоемкости разрушения.

2. Физические особенности деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического металлического сплава связаны с уменьшением активационного объема и локальным разогревом материала в области деформирования по механизму Спейнера с серией атомных прыжков и соответствующим перемещением свободного объема. Данный механизм будет обусловливать повышение пластических свойств композита на основе аморфного сплава в условиях низкотемпературного одноосного растяжения.

3. Выявление закономерностей деформирования на границе аморфного и кристаллического сплава позволит разрабатывать композиционные соединения аморфных и легкоплавких кристаллических металлических сплавов со значительными пластическими свойствами в области низких температур.

ЛИТЕРАТУРА

- Температура хрупко-вязкого перехода трубной стали К65 экспериментальное определение и сопутствующие признаки / А.Б. Арабей, А.Г. Глебов, Л.М. Капуткина, И.Ю. Пышминцнев, С.Е. Яковлев, А.И. Абакумов, Д.Е. Капуткин // Вести газовой науки. 2020. № 2 (44). С. 152–161.
- Shinkin V.N. Analytical calculus of sheet curvature on four-roll mills at tubes production // CIS Iron and Steel Review. – 2022. – Vol. 23. – P. 50–55.
- Kaputkin D.E. Reversible martensitic transformation, ageing and low-temperature tempering of iron-carbon martensite // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 438–440. – P. 207–211. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.182.
- 4. *Мильман Ю.В., Козырев Д.В.* О механизмах деформации в аморфных металлических сплавах // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2014. Т. 57, № 8. С. 50–55.
- 5. Шинкин В.Н. Кривизна биметаллического бруса после его осевого упругопластического растяжения // Черные металлы. 2023. № 4. С. 60–64. DOI: 10.17580/chm. 2023.04.10.

- 6. Шинкин В.Н. Предварительная правка стальной полосы // Черные металлы. 2018. № 5. С. 34–40.
- 7. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 1986. 22 с.
- 8. Ushakov I.V., Oshorov A.D. Viscosity of microdestruction of multilayer composite and method of its revealing // Materials Science Forum. 2022. Vol. 1052. P. 110-115.
- 9. Ушаков И.В., Ошоров А.Д. Микроразрушение многослойного композита на основе аморфно-нанокристаллического металлического сплава // Вестник Московского авиационного института. –2022. – Т. 29, № 3. – С. 246–252.
- Ushakov I.V., Safronov I.S. Directed changing properties of amorphous and nanostructured metal alloys with help of nanosecond laser impulses // CIS Iron and Steel Review. – 2021. – Vol. 22. – P. 77–81.
- 11. Safronov I.S., Ushakov A.I. Targeted alternation in properties of solid amorphousnanocrystalline material in exposing to nanosecond laser radiation // Defect and Diffusion Forum. - 2021. - Vol. 410. - P. 469-474.
- Comparative analysis of the crystallization mechanisms and kinetics in the Ti50Ni25Cu25 alloy amorphized by melt quenching or severe plastic deformation / R.V. Sundeev, A.V. Shalimova, A.V. Krivoruchko, A.M. Glezer, A.A. Veligzhanin, V.A. Khonik // Intermetallics. – 2022. – Vol. 141. – P. 107372. – DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107372.

PHYSICS OF DEFORMATION AND FRACTURE AT THE INTERFACE OF AMORPHOUS AND CRYSTALLINE METAL ALLOYS

Ushakov I.V., Oshorov A.D., Safronov I.S.

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

This study is aimed at studying the physical mechanisms of deformation and fracture in the region of the boundary between amorphous and crystalline alloys at low temperatures. Experimental studies were carried out on composite samples with the solder POCK 50-18 at different temperatures (152 K, 219 K and 293 K). The results showed that when the temperature decreases, the strength and ductility of the material decrease, which can lead to the formation of defects and cracks. Composite samples with the solder POCK 50-18 behave quite stably at low temperatures, but still deteriorate their mechanical properties when the temperature drops to 219 K. The results obtained can be used for the development of new materials and technologies for joining amorphous and crystalline alloys for low-temperature applications.

Keywords: physics of deformation, amorphous alloy, fusible alloy, composite, uniaxial tension, low-temperature deformation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-7-15

REFERENCES

- Arabey A.B., Glebov A.G., Kaputkina L.M., Pyshmintsnev I.Yu., Yakovlev S.E., Abakumov A.I., Kaputkin D.E. Temperatura khrupko-vyazkogo perekhoda trubnoi stali K65 – eksperimental'noe opredelenie i soputstvuyushchie priznaki [Experimental determination and concomitant signs of a brittle-ductile transition temperature for K65-grade pipe steel]. *Vesti* gazovoi nauki, 2020, no. 2 (44), pp. 152–161. (In Russian).
- Shinkin V.N. Analytical calculus of sheet curvature on four-roll mills at tubes production. CIS Iron and Steel Review, 2022, vol. 23, pp. 50–55.
- 3. Kaputkin D.E. Reversible martensitic transformation, ageing and low-temperature tempering of iron-carbon martensite. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 438–440, pp. 207–211. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.182.
- 4. Milman Yu.V., Kozyrev D.V. O mekhanizmakh deformatsii v amorfnykh metallicheskikh splavakh [On the deformation mechanisms in metallic glasses]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy, 2014, vol. 57, no. 8, pp. 50–55.

- Shinkin V.N. Krivizna bimetallicheskogo brusa posle ego osevogo uprugoplasticheskogo rastyazheniya [The curvature of steel bimetallic beam after its axial elastoplastic stretching]. *Chernye metally*, 2023, no. 4, pp. 60–64. DOI: 10.17580/chm.2023.04.10. (In Russian).
- 6. Shinkin V.N. Predvaritel'naya pravka stal'noi polosy [Preliminary straightening of steel strip]. *Chernye Metally*, 2018, no. 5, pp. 34–40. (In Russian).
- 7. GOST 1497–84. *Metally. Metody ispytanii na rastyazhenie* [State Standard 1497–84. Metals. Methods of tension test]. Moscow, Standards Publ., 1986. 22 p.
- 8. Ushakov I.V., Oshorov A.D. Viscosity of microdestruction of multilayer composite and method of its revealing. *Materials Science Forum*, 2022, vol. 1052, pp. 110–115.
- 9. Ushakov I.V., Oshorov A.D. Mikrorazrushenie mnogosloinogo kompozita na osnove amorfno-nanokristallicheskogo metallicheskogo splava [Micro-fracture of multilayer composites based on morphous-nanocrystalline metal alloy]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta = Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 246–252.
- Ushakov I.V., Safronov I.S. Directed changing properties of amorphous and nanostructured metal alloys with help of nanosecond laser impulses. *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 22, pp. 77–81.
- 11. Safronov I.S., Ushakov A.I. Targeted alternation in properties of solid amorphousnanocrystalline material in exposing to nanosecond laser radiation. *Defect and Diffusion Forum*, 2021, vol. 410, pp. 469–474.
- Sundeev R.V., Shalimova A.V., Krivoruchko A.V., Glezer A.M., Veligzhanin A.A., Khonik V.A. Comparative analysis of the crystallization mechanisms and kinetics in the Ti50Ni25Cu25 alloy amorphized by melt quenching or severe plastic deformation. *Intermetallics*, 2022, vol. 141, p. 107372. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107372.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Ушаков Иван Владимирович – родился в 1972 году, д-р техн. наук, профессор кафедры физики НИТУ «МИСИС», Действительный член Российской академии естественных наук. Область научных интересов: формирование свойств твердых материалов селективной лазерной обработкой неоднородных нано- и микромасштабных областей. Опубликовано 260 научных работ. (Адрес: 119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4. E-mail: ushakoviv@mail.ru).

Ushakov Ivan Vladimirovich (b. 1972) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at rhe Physics Department NUST MISIS, academician of the Russian Academy of Natural Sciences. His research interests are currently focused on formation of properties of solid materials by selective laser treatment of inhomogeneous nano- and micro-scale regions. He is the author of 260 scientific papers. (Address: 4, Leninskii Av., Moscow, 119049, Russia. E-mail: ushakoviv@mail.ru).



Ошоров Аюр Дашеевич – родился в 1996 году, аспирант, ассистент кафедры физики НИТУ «МИСИС». Область научных интересов: металлические сплавы, механические свойства аморфных, аморфно-нанокристаллических металлов и композиционных материалов на их основе. Опубликовано 15 научных работ. (Адрес: 119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4. E-mail: oshorovayur@gmail.com).

Oshorov Ayur Dasheevich (b. 1996) – postgraduate student, assistant lecturer, at the Physics Department, NUST MISIS. His research interests are currently focused on metal alloys, mechanical properties of amorphous, amorphous-nanocrystalline metals and composite materials on their basis. He is the author of 15 scientific papers. (Address: 4, Leninskii Av., Moscow, 119049, Russia. E-mail: oshorovayur@gmail.com).



Сафронов Иван Сергеевич – родился в 1989 году, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики НИТУ «МИСИС». Область научных интересов: формирование физико-механических свойств аморфных и нанокристаллических металлических сплавов селективной лазерной обработкой; физико-химические свойства поверхности твердых материалов на границе различных сред. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес 119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4. E-mail: issafronov@yandex.ru).

Safronov Ivan Sergeevich (b. 1989) – Candidate of Sciences (Phys. & Math.), associate professor at the Physics Department, NUST MISIS. His research interests include formation of physical and mechanical properties of amorphous and nanocrystalline metal alloys by selective laser treatment; physico-chemical properties of the surface of solid materials at the boundary of various media, as well as amorphous and nanostructured materials, including the study of new substances, the development of materials and nanomaterials with specified properties and functions. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 4, Leninskii Av., Moscow, 119049, Russia. E-mail: issafronov@yandex.ru).

Статья поступила 17 мая 2023 г. Received May 17, 2023

To Reference:

Ushakov I.V., Oshorov A.D., Safronov I.S. Fizika deformirovaniya i razrusheniya na granitse amorfnogo i kristallicheskogo metallicheskogo splava [Physics of deformation and fracture at the interface of amorphous and crystalline metal alloys]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 2 (59), pp. 7–15. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-7-15.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

апрель-июнь

№ 2 (59)

УДК 62-83:621.313

2023

ВЫСОКОДИНАМИЧНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ «МЕРТВОГО ВРЕМЕНИ» В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДАХ НА БАЗЕ СИГНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ

А.А. Кромм¹, Г.М. Симаков², А.Е. Гусев²

¹Linde Material Handling GmbH ²Новосибирский государственный технический университет

В статье рассматриваются особенности анализа и синтеза системы высокодинамичной компенсации «мертвого времени» (МВ) в контуре тока двигателей, запитанных от транзисторных широтно-импульсных преобразователей. В первой части работы приведен краткий анализ существующих технических решений, алгоритмы которых не предполагают изменений или дополнений в силовой части привода, а следовательно, реализуемы с исключительно программными средствами. Показано, что наиболее современными и перспективными можно считать методы адаптивной компенсации с применением, например, эталонных моделей объекта управления. В работе предложена беспоисковая адаптивная система компенсации «мертвого времени», обеспечивающая в контуре тока электродвигателя сигнальную самонастройку, причем компенсация MB основана не на линеаризации или корректировке нелинейных эффектов и задержек широтно-импульсного преобразователя, а на парировании возмущающих воздействий и помех, обусловленных негативным влиянием «мертвого времени». Особое внимание при работе над статьей уделялось практической направленности предложенного решения, поэтому рассмотренный алгоритм базируется, исключительно, на основных, проверенных практикой, принципах теории управления. Данный подход позволяет обеспечить не только прозрачность теоретических рассуждений, изложенных в статье, но и сократить временные затраты на анализ и синтез контура тока, цель которых в конечном счете – оптимизация высокопрецизионных приводов. С отсутствием итерационных методов математики редуцируются ресурсы микропроцессорных блоков управления, что делает данный метод еще более привлекательным в низкобюджетных приводах, не претендующих на «эксклюзивность» интегральной схемотехники. Предложенный алгоритм был интегрирован в уже существующий контур тока асинхронного электропривода с векторным управлением, который доказал высокую эффективность статической и динамической компенсации не только МВ преобразователя, но и связанных с ним трудноанализируемых нелинейных эффектов. Адаптивная компенсация в сравнении с компенсацией МВ по принципу вольтдобавки позволила увеличить коэффициент полезного действия электрического привода на низких частотах вращения двигателя, а также уменьшить пульсации вращающего момента. Приведена осциллограмма фазного тока реального асинхронного электропривода с компенсацией MB по принципу параметрической вольтдобавки как наиболее распространенной на практике, а также осциллограмма тока с адаптивным компенсационным воздействием по принципу, рассмотренному в данной статье.

Ключевые слова: широтно-импульсный преобразователь, «мертвое время», компенсация, эталонная модель, сигнальная самонастройка, пространство состояний, пример применения, осциллограммы тока.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-16-28

Введение

Точность воспроизведения задающего воздействия в приводах переменного тока с ШИМ-преобразователями зависит от многих факторов, перечисление которых в одной статье невозможно. Однако известно, что наибольшее влияние на качество управляющих воздействий в канале ШИМ оказывает наличие пауз

© 2023 Кромм А.А., Симаков Г.М., Гусев А.Е.

между интервалами управляемости полупроводников преобразователя [1-4], которое часто называется «мертвым временем» или бестоковыми паузами. Введение таких пауз необходимо для исключения коротких замыканий источника питания через фазы инвертора при коммутации комплементарной пары транзисторов. Следует отметить важнейшие недостатки приводов переменного тока с ШИМ, в случае отсутствия компенсации бестоковых пауз:

- искажение желаемой формы тока двигателя;

– ухудшение гармонического состава тока двигателя, которое приводит к увеличению потерь в приводе;

 неравномерность вращения электрического двигателя привода, особенно при малых частотах вращения;

 на низких оборотах двигателя возможны значительные вибрации и дополнительные акустические шумы. Вибрации двигателя могут привести к нарушению изоляции обмоток двигателя и выходу их из строя;

– нелинейная характеристика звена «мертвого времени» часто нарушает устойчивость систем управления и привода в целом, например, вследствие недопустимых пульсаций вращающего момента двигателя.

Причиной вышеуказанных недостатков является отклонение преобразованного напряжения от желаемого (заданного) вследствие негативного воздействия MB. Величину относительного отклонения преобразованного напряжения можно оценить по зависимости, приведенной в [1]:

$$\Delta \hat{u}_1 = \frac{\Delta U_i}{U^*} = \frac{2\tau U_0}{U^*} \operatorname{sign}(i), \tag{1}$$

где $\Delta \hat{u}_{l}$ – относительное отклонение выходного напряжения от заданного; ΔU_{i} –

абсолютное отклонение напряжения от заданного; U^* – среднее значение выходного напряжения преобразователя; U_0 – напряжение в звене постоянного тока; τ – относительная длительность одной коммутации комплементарной пары транзисторов; sign(*i*) – знак направления тока в нагрузке.

При малых значениях задающего воздействия (напряжений) относительная погрешность воспроизведения может составить ±40 % [1]. Такое рассогласование между заданным и истинным напряжением в современных приводах неприемлемо и требует обязательной компенсации «мертвого времени» (КМВ). Чем точнее привод, тем более высокие требования предъявляются к КМВ.

В отечественной и зарубежной технической литературе достаточно много теоретических исследований, направленных на повышение качества компенсации «мертвого времени». Особенный интерес, конечно, представляют решения, не требующие изменений и дополнений в силовой части привода и, следовательно, реализуемые исключительно программными средствами. В случае реализации КМВ программным продуктом наиболее часто на практике используются два метода: первый из которых формирует компенсирующий сигнал через параметрическую вольтдобавку, модуль которой рассчитывается одним из «жестких» алгоритмов, а знак определяется направлением тока нагрузки. При втором способе компенсация производится адаптивными алгоритмами без «прямого» расчета корректирующего воздействия.

К первому способу можно отнести решения, описанные в [1-3]. Например, в [1] предлагается формировать компенсирующее воздействие (u_k) с учетом выражения

$$u_k = 2\tau U_0 \operatorname{sign}(i),$$

которое позволяет идеально компенсировать MB в случае его полного совпадения с описанием (1). В [2] приводится общее исследование выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя (ШИП) с учетом его нелинейных эффектов, а также сформулированы рекомендации по применению параметрической компенсации. Наряду с негативным влиянием MB на выходное напряжение преобразователя в работе исследуется проблема непостоянства падения напряжения на транзисторах ШИП, которая приводит к дополнительным искажениям токов и моментов привода. В работе показано, что спектральные характеристики момента позволяют оценивать влияние нелинейностей инвертора на конечную точность замкнутой системы управления электропривода, с учетом которых варьируется амплитуда компенсационного воздействия параметрической КМВ, и тем самым минимизируется негативное влияние нелинейностей.

Один из модифицированных способов КМВ, реализующий амплитуднофазовую вольтдобавку с учетом заданного положения вектора напряжения ШИП, предложен в [3]. Так, на рабочей частоте ШИМ формируется вектор компенсационного напряжения статора с заданной амплитудой и фазой. Разработаны алгоритм и методика настройки пофазной компенсации «мертвого времени», обеспечивающие высокую точность формирования желаемого напряжения статора. Авторы утверждают, что применение указанной методики позволило достичь погрешности электромагнитного момента не более 5 % во всех рабочих режимах электропривода, включая зоны глубокого регулирования скорости.

Не углубляясь в дальнейшей анализ достоинств и недостатков вышеуказанных решений, следует отметить два основных недостатка параметрической КМВ, ограничивающих ее массовое применение на практике: недостаточная точность компенсационных алгоритмов вследствие необходимости использования измеренных величин, а также трудоемкость оптимизации настроек привода при попытке линеаризовать нелинейные характеристики ШИП. Кроме того, практический анализ МВ требует, как правило, многочисленных допущений, реализация которых в приводе трудновыполнима или нереальна. Так, например, в [4] исследован и рекомендован к применению метод компенсации МВ на базе вольтдобавки со следующими допущениями:

– падение напряжения на открытом ключе пренебрежимо мало;

– импульсы управления имеют идеальные фронты;

 переход между включенным и выключенным состоянием ключа определяется фиксированными значениями;

- напряжение звена постоянного тока постоянно.

Учитывая вышесказанное, несложно представить трудоемкость практической реализации вышеупомянутых параметрических КМВ, если бы одну из них пришлось реализовать в прецизионных приводах.

Устранить указанные недостатки позволяют системы КМВ, использующие современную теорию и практику адаптивных систем. Классическим примером реализации адаптивных систем КМВ являются системы с эталонной моделью объекта по принципу «Smith predictor», где в токовый контур привода вводится идеализированная модель объекта, дополнительная модель, описывающая поведение МВ в ШИП, а также фильтр подавления помех. Рассогласование координат идеализированного и реального объекта является базисным сигналом компенсации МВ, поступающего совместно с обратной связью по току на вход регулятора тока. Концепт, достоинства и примеры практической реализации такой КМВ подробно описаны в [5–9]. Например, в [5, 6] отмечается, что предиктор Смита является эффективным инструментом для управления системами с запаздыванием (к которым можно отнести ШИП с МВ), однако его использование требует точной оценки параметров объекта управления и транзитной задержки МВ. Модификации предиктора Смита, направленные на оптимизацию систем КМВ, трудоемки [8, 9] и не всегда эффективны на практике [8].

Следующие недостатки КМВ с использованием предиктора Смита значительно ограничивают массовое применение данного метода в электроприводах:

 присутствие наряду с блоком эталонной модели таких нестационарных звеньев, как модель транзитной задержки, описывающей МВ;

 так как сигнал рассогласования между реальным объектом и предиктором Смита суммируется с сигналом обратной связи по току и поступает на вход регулятора, невозможно в системе управления разделить движения на управляющие и компенсирующие;

 – фильтр помех, параметры которого зачастую требуют изменений в процессе регулирования координат привода;

 – большое количество параметров в системе, требующих их оптимизации в процессе наладки привода.

Цель работы

Целью работы является разработка концепции, анализа и синтеза высокодинамичной системы компенсации «мертвого времени» широтно-импульсного преобразователя в контуре тока электродвигателя на базе беспоисковых адаптивных систем с исключительно одной эталонной моделью, причем негативное влияние MB рассматривается не как процесс нелинейного искажения или задержки формирования желаемого напряжения в преобразователе, а как «классическое» возмущающее воздействие на выходе преобразователя, приложенное к контуру тока. Эффективность метода предлагается оценить по таким показателям, как форма фазного тока двигателя, коэффициент полезного действия электропривода при малых частотах вращения и амплитуда пульсаций вращающего момента двигателя. Базисом для сравнения выбран привод с компенсацией «мертвого времени» по принципу вольтдобавки, приведенной в [1]. Рассмотренный в статье метод компенсации MB ориентирован на практическое применение, поэтому минимизация параметров и настроек является также целью работы.

Теоретическая часть

Постановка задачи:

 компенсация «мертвого времени» должна осуществляется в электроприводах постоянного и переменного тока с явно выраженным контуром тока, охваченного отрицательной обратной связью;

– для анализа и синтеза системы КМВ предполагается использовать идеи и методы адаптивных систем с эталонными моделями. Приоритетной является сигнальная адаптация как наиболее «прозрачная» при практической реализации. Эталонная модель не должна содержать нелинейных и нестационарных звеньев;

– необходимо доказать целесообразность использования сигнальной адаптации для приводов с ШИП, так как данная адаптация, согласно теории построения таких систем, может оказаться чувствительной к возмущающим воздействиям и помехам (такое доказательство особенно важно с точки зрения тезиса о представлении МВ внешним возмущающим фактором в контуре тока);

 – анализ и синтез системы КМВ должны осуществляется в рамках теории беспоисковых систем, в моделях которых параметры стационарны, но в объекте управления допустимо присутствие «медленно» меняющихся параметров; – алгоритм КМВ должен без труда интегрироваться в привод с микропроцессорным управлением, обеспечивая при этом инвариантность к скалярному или векторному управлению. Изменения или дополнения схемотехнических решений силовой части привода исключаются;

 – алгоритм КМВ предполагается использовать в оптимизированных по стоимости микропроцессорах, не обладающих «сверхресурсами»;

 – результаты предложенной КМВ необходимо сравнить с результатами уже существующих решений, например, реализуемыми методами параметрической компенсации.

Анализ и синтез токового контура с адаптивной КМВ, как было упомянуто выше, предлагается осуществить на базе теории и практики адаптивных систем с явной эталонной моделью, которая успешно применялась и продолжает применяться в современных системах управления [10–12]. Ниже будет проверено предположение, что система с эталонной моделью и сигнальной адаптацией в контуре регулирования тока обеспечит простую и эффективную на практике компенсацию MB.

Для обеспечения сигнальной самонастройки в контуре тока электропривода воспользуемся беспоисковой адаптивной системой, описанной в [10] и представленной на рис. 1, где X(s) – сигнал задания тока двигателя; Y(s) – сигнал, соответствующий истинному току статора двигателя; $W_m(s)$ – передаточная функция эталонной модели; $W_r(s)$ – передаточная функция регулятора тока ШИП, $W_0(s)$ – передаточная функция объекта управления; K(s) – передаточная функция корректирующего звена; K_0 – коэффициент обратной связи по току.



Рис. 1 – Структурная схема контура тока электропривода с эталонной моделью
Fig. 1 – Block diagram of the electric drive current loop with

a reference model

В процессе функционирования системы (независимо от наличия или отсутствия MB) параметры эталонной модели не изменяются и соответствуют значениям, при которых переходные процессы в модели близки к желаемым переходным процессам в системе управления в целом. Возможность использования самонастройки при выбранных параметрах контура тока целесообразно показать с помощью структурных преобразований. Первым этапом свернем контур с передаточными функциями $W_0(s)$, K(s) и единичной обратной связью, предварительно перенеся сумматор за блок K(s):

$$W_{0}'(s) = \frac{W_{0}(s)}{W_{0}(s)K(s)+1}$$

и, заменяя передаточную функцию K(s) теоретически бесконечным коэффициентом усиления $K \to \infty$, передаточную функцию замкнутой системы можно приблизительно заменить передаточной функцией модели:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} \approx W_m(s)K(s)W_o'(s) = \frac{W_m(s)K(s)W_o(s)}{W_o(s)K(s)+1} \approx W_m(s).$$

Реализуя таким образом адаптацию в контуре тока, поставим вопрос: какой степени компенсации MB следует ожидать в данной системе, если влияние «мертвого времени» рассматривается как возмущающее воздействие с варьируемой амплитудой и ограниченным коэффициентом K? Для разрешения данного вопроса структурную схему контура тока на рис. 1 целесообразно представить в обобщенном виде на рис. 2, воспользовавшись математическим аппаратом метода переменных состояний [13, 14] с явно выделенным вектором возмущения.



Рис. 2 – Обобщенная структурная схема контура тока электропривода с эталонной моделью и приложенным вектором возмущения s_d *Fig.* 2 – A generalized block diagram of the drive current loop with a reference model and an applied disturbance vector s_d

В структурной схеме контура тока приняты следующие обозначения: **u** – вектор управляющих воздействий; \mathbf{x}_{o} – вектор выходных координат системы; \mathbf{A}_{m} , \mathbf{A}_{o} – матрицы параметров модели и объекта; **B**, **K** – матрицы управляющих и корректирующих воздействий, \mathbf{s}_{d} – вектор возмущений; **P** – матрица конфигураций всех возмущений, включая негативное воздействие MB. (Замечание: матрицы **D** и **C** [12, 13], формирующие выходные координаты системы управления, в данной структурной схеме определены как $\mathbf{D}_{m} = \mathbf{D}_{o} = 0$, $\mathbf{C}_{m} = \mathbf{C}_{o} = = \text{diag}(1, ..., 1)$ и соответственно на рисунке 2 не представлены.)

Для оценки степени парирования возмущений в структуре на рис. 2 следует рассмотреть рассогласование переменных состояний $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{P} \mathbf{s}_{d}$ как функцию следующих переменных:

$$\Delta x = F(\mathbf{x}_{o}, \dot{\mathbf{x}}_{o}, \mathbf{s}_{d}, \mathbf{u})$$

и, требуя условия $\Delta x \to 0$ (если, конечно, оно выполнимо) осуществить синтез коэффициентов матрицы **K**. В случае идеального результата $\Delta x = 0$ парирование возмущений системой абсолютно.

Итак, исходные уравнения системы регулирования относительно производных переменных состояний модели и объекта:

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{B}\mathbf{u} , \qquad \dot{\mathbf{x}}_o = \mathbf{A}_o \mathbf{x}_o + \mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{P}\mathbf{s}_d + \mathbf{K}(\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_o).$$
(2)

Записывая второе уравнение из (2) для отклонений выходных координат модели и объекта Δx :

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{K}^{-1} (\dot{\mathbf{x}}_{0} - \mathbf{A}_{0} \mathbf{x}_{0} - \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{P} \mathbf{s}_{d}), \tag{3}$$

можно заметить, что коэффициенты элементов матрицы **K** редуцируют не только векторы $\dot{\mathbf{x}}_{o}$, $\mathbf{A}_{o}\mathbf{x}_{o}$, $\mathbf{B}\mathbf{u}$, но и вектор приложенных возмущений \mathbf{Ps}_{d} . В чисто теоретическом случае, при котором матрица **K** имеет бесконечные коэффициенты $k_{n,m} \rightarrow \infty$, выходные координаты модели и объекта во всех режимах привода идентичны ($\Delta \mathbf{x} = 0$) и, как следствие, инвариантны к влиянию вектора \mathbf{Ps}_{d} , а значит и к негативному влиянию «мертвого времени» преобразователя. Таким образом, безынерционное корректирующее звено в виде матрицы **K** помогает решить две задачи: обеспечить прецизионную самонастройку в системе с эталонной моделью и также редуцировать возмущения, приложенные к контуру тока.

Для дальнейшей оценки степени парирования возмущений в предложенной КМВ целесообразно перевести систему в установившийся режим, при котором выполняется условие $\dot{\mathbf{x}}_m = \dot{\mathbf{x}}_0 = 0$. В этом случае уравнение (3) запишется в упрощенном виде:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{K}^{-1} \left(\mathbf{P} \mathbf{s}_d - (\mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{A}_0 \mathbf{x}_0) \right).$$
(4)

Учитывая, что в адаптивной системе с глубокими обратными связями разница векторов $Bu + A_o x_o$ весьма мала, выражение (4) трансформируется в еще более простое:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{P} \mathbf{s}_{d}.$$
 (5)

Из последнего уравнения определение степени парирования возмущений для реальных коэффициентов (элементов) матрицы К не представляет труда. Простым примером может быть оценка степени парирования негативного воздействия MB, соответствующая величине абсолютного отклонения преобразованного напряжения преобразователя ΔU_i от заданного, рассмотренного в (1). В этом случае уравнение (5) вырождается в скалярное:

$$\Delta x = 2\tau U_0 \operatorname{sign}(i) / k_{om} = \pm \Delta U_i / k_{om},$$

где k_{om} – коэффициент усиления рассогласования координат модели и объекта (трансформированная в скаляр матрица **K**). Матрица **P** также трансформированная, тождественно равна **P** = 1, что соответствует только одной точке приложения MB, как возмущения.

Экспериментальные исследования

Для пояснения практического применения предложенного метода целесообразно вернуться к рис. 1. Допустим, объект в контуре тока описывается апериодическим звеном с передаточной функцией, наиболее часто применяемой в практике построения электроприводов:

$$W_{\rm o}(s) = \frac{k_{mot}}{T_{mot}s + 1},$$

где $W_0(s)$ – передаточная функция объекта; T_{mot} – электромагнитная постоянная времени двигателя; k_{mot} – коэффициент усиления двигателя по току; s – оператор Лапласа.

Следуя идее беспоисковых адаптивных систем, передаточные функции и параметры эталонной модели $W_m(s)$ должны быть идентичными передаточной функции и параметрам объекта управления $W_o(s)$. Элементы матрицы **K** выбираются достаточно большими. Так как в рассматриваемом случае объект описывается дифференциальным уравнением первого порядка, то матрица **K** трансформируется в скаляр, как было показано выше. Регулятор тока может быть стандартным, например, ПИД-регулятором. Управляемость предложенного контура тока может быть проверена критериями управляемости систем, изложенными, например, в [13, 14].

Разработка предложенной адаптивной КМВ с последующей ее имплементацией в контур тока уже существующего асинхронного привода позволила существенно улучшить качество фазного тока двигателя, вид которого представлен на рис. 3.



Рис. 3 – Осциллограмма фазного тока асинхронного двигателя с адаптивной компенсацией МВ



На рис. 4 представлена для сравнения осциллограмма фазного тока того же асинхронного двигателя с компенсацией MB по принципу параметрической вольтдобавки, изложенной в [1]. Недостаточная точность корректирующего воздействия является основным препятствием ее применения в прецизионных приводах, так как данный способ требует точного измерения пульсирующего напряжения в звене постоянного тока и учета знака тока двигателя.



Рис. 4 – Осциллограмма фазного тока асинхронного двигателя с компенсацией MB по принципу параметрической вольтдобавки

Fig. 4 – Oscillogram of the phase current of an induction motor with MV compensation according to the principle of parametric voltage boost

Улучшенное качество фазного тока двигателя позволило в сравнении с компенсацией MB по принципу вольтдобавки уменьшить пульсации вращающего момента двигателя, обеспечить большую стабильность вращения двигателя при малых оборотах, а также увеличить коэффициент полезного действия электрического привода.

Заключение

1. Предложенная методика высокодинамичной компенсации MB использует опыт построения современных адаптивных систем, причем MB представлено «классическим» возмущающим воздействием, приложенным к контуру тока, парирование которого осуществляется на базе безынерционной коррекции выходных сигналов объекта и эталонной модели, являющейся составной частью сигнальной самонастройки.

2. Предложен вариант анализа высокодинамичной компенсации MB, позволяющий в статических режимах привода с достаточно высокой точностью оценить степень парирования возмущений, вызванных MB. При оценке используется простое алгебраическое выражение в векторно-матричной форме. На основе практических результатов можно заключить, что допущения, сделанные при анализе КMB, целесообразны и обоснованы.

3. Нелинейности преобразователя, например, связанные с непостоянством величины падения напряжения на открытых транзисторах или разбросом дифференциальных падений напряжений по всей «ветви» вольт-амперных характеристик транзисторов, значительно редуцируют свое негативное влияние на формирование желаемого тока привода посредством коррекции рассогласования сигналов объекта и эталонной модели.

4. Предложенный алгоритм предпочтителен в оптимизированных по стоимости приводах, так как его программное обеспечение не требует эксклюзивных ресурсов блоков управления. Так, например, в низкобюджетном микропроцессоре с тактовой частотой 100 МГц время вычисления предложенного алгоритма составляет не более 1,2 мкс при реализации его во вращающейся системе координат векторного управления приводом. 5. Сравнение кривых фазного тока (рис. 3 и 4) позволяет сделать вывод о высокой точности компенсационного алгоритма, и, следовательно, о допустимости представления МВ классическим возмущающим воздействием в контуре тока. Тестирование КМВ проводилось в приводе со значительными пульсациями напряжения в звене постоянного тока, преднамеренно запитанного от аккумуляторной батареи малой емкости.

6. Алгоритм предложенного метода КМВ не ухудшает прецизионность воспроизведения желаемых управляющих воздействий, так как, во-первых, разделены каналы управления и компенсации, и во-вторых, отпадает необходимость «прямого» учета направления (знака) тока. Известно, что при учете знака тока необходимо введение дополнительных нелинейных элементов, например, устраняющих «дребезг нуля» [15].

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
- Искажение выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя прецизионного электропривода / В.С. Томасов, С.Ю. Ловлин, С.А. Тушев, Н.А. Смирнов // Вестник ИГЭУ. 2013. № 1. С. 84–87.
- Методика настройки измерительных каналов электропривода переменного тока с высоким качеством регулирования переменных / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, Н.А. Глебов, С.В. Журавлев // Труды Международной шестнадцатой научнотехнической конференции «Электроприводы переменного тока», г. Екатеринбург, 05–09 октября 2015 г. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 55–58.
- Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Дымко С.С. Исследование влияния мертвого времени в преобразователях частоты // Труды Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные проблемы электроэнерготехники и автоматики». – Киев: Политехника, 2009. – С. 35–38.
- 5. Бураков М.В., Коновалов А.С. Модификация предиктора Смита для линейного объекта с переменными параметрами // Информационно-управляющие системы. 2017. № 4. С. 25–34. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.4.25.
- Schmirgel H., Krah J.O., Berger R. Delay time compensation in the current control loop of servo drives – higher bandwidth at no trade-off // PCIM Europe Proceedings. – Nürnberg, Germany, 2006. – P. 541–546.
- Klarenbach C., Schmirgel H., Krah J.O. Design of fast and robust current controllers for servo drives based on space vector modulatio // PCIM Europe. – Nürnberg, Germany, 2011. – P. 182–188.
- Predictive control for a permanent magnet synchronous motor using automatic tuning Smithpredictor with optimal parameter mismatch / Q. Zhang, A. Shen, Q. Tong, H. Qin // 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. – Wuhan, China, 2008. – P. 1520–1525.
- Patent EP No. WO2011120689A1. Entkopplung der Regelgrössen in einem Fluidfördersystem mit Totzeit / J. Kiesbauer, D. Vnucec, J. Fuchs, U. Konigorski. – 2011.
- Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982. – 382 с.
- 11. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 216 с.
- Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Самонастраивающаяся система с эталонной моделью для управления движением подводного аппарата // Автометрия. – 2015. – Т. 51, № 5. – С. 42–52.
- Schroeder D. Elektrische Antriebe, regelung von antriebssystemen. Berlin: Springer, 2009. – 1336 p. – DOI: 10.1007/978-3-540-89613-5.

- 14. Сю Д., Мейер А. Современная теория автоматического управления и ее применение / под ред. Ю.И. Топчеева. М.: Машиностроение, 1972. 544 с.
- 15. Patent Germany No. DE102012111696A1. Verfahren und Vorrichtung zur Totzeitkompensation / Lamsahel H., Zehringer T., Sworowski E. – 2014.

HIGHLY DYNAMIC "DEAD TIME" COMPENSATION IN ELECTRIC DRIVES BASED ON SIGNAL ADAPTATION

Kromm A.A.¹, Simakov G.M.², Gusev A.E.²

¹Linde Material Handling GmbH, Aschaffenburg, Germany ²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The article discusses the analysis and synthesis of a system of highly dynamic "dead time" compensation in the current loop of motors powered from transistor pulse-width converters. The first part of the paper provides a brief analysis of existing technical solutions, whose algorithms do not imply changes or additions to the power part of the drive and therefore are implemented exclusively by software. It is shown that the most modern methods of adaptive compensation can be considered using reference models of the control object. A non-search adaptive dead-time compensation system is proposed in the paper which provides signal self-tuning in the motor current loop, and dead-time compensation is based not on linearization or correction of nonlinear effects and delays of a pulse-width converter, but on parrying disturbing influences caused by the negative effects of "dead time". Particular attention is paid to the practical orientation of the proposed solution; therefore, the considered algorithm is based solely on the basic principles of the control theory proven by practice. This approach allows us to ensure not only the transparency of the theoretical arguments presented in the article, but also reduce the time spent on the analysis and synthesis of the current loop, the purpose of which, ultimately, is the optimization of highprecision drives. With the absence of iteration methods of mathematics, the resources of microprocessor control units are minimized, which makes this method even more attractive in lowbudget drives that do not claim to "exclusivity of integrated circuitry. The proposed algorithm was integrated into the existing current loop of an asynchronous electric drive with vector control, which proved the high efficiency of static and dynamic compensation of not only the "dead time" of the converter, but also of the non-linear effects associated with it that are difficult to analyze. The adaptive "dead time" compensation increased the efficiency of the electric drive at low motor speeds, compared to voltage boost compensation, by approximately four percent, and also reduced the motor torque ripple by about seventeen percent. An oscillogram of the phase current of a real drive with "dead time" compensation is given according to the principle of parametric voltage addition, which is the most common in practice, as well as a waveform of current with adaptive compensation according to the principle considered in this article.

Key words: with pulse-width converter, «dead time», compensation, reference model, selftuning principle, state space, example of application, waveforms of current.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-16-28

REFERENCES

- Shreiner R.T. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty [Mathematical modeling of alternating current electric drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2000. 654 p.
- Tomasov V.S., Lovlin S.Ju., Tushev S.A., Smirnov N.A. Iskazhenie vykhodnogo napryazheniya shirotno-impul'snogo preobrazovatelya pretsizionnogo elektroprivoda [Output voltage distortion of pulse width converter of precision electric drive]. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University, 2013, no. 1, pp. 84–87.

- 3. Vinogradov A.B., Gnezdov N.E., Glebov N.A., Zshuravlev S.V. [A technique for setting up the measuring channels of an AC electric drive with a high quality of variable regulation]. *Trudy Mezhdunarodnoi shestnadtsatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka»* [Proceeding of the sixteenth international scientific-technical conference "Alternating current electrical drives"]. Ekaterinburg, 2015, pp. 55–58. (In Russian).
- 4. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Dymko S.S. [Investigation of dead time influence in frequency converters]. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Sovremennye problemy elektroenergotekhniki i avtomatiki»* [Proceedings of the International scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students "Modern problems of electrical power engineering and automation"]. Kiev, 2009, pp. 35–38. (In Russian).
- 5. Burakov M.V., Konovalov A.S. Modifikatsiya prediktora Smita dlya lineinogo ob"ekta s peremennymi parametrami [Modification of Smith predictor for a linear plant with changeable parameters]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2017, no. 4, pp. 25–34. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.4.25.
- Schmirgel H., Krah J.O., Berger R. Delay time compensation in the current control loop of servo drives – higher bandwidth at no trade-off. *PCIM Europe Proceedings*, Nürnberg, Germany, 2006, pp. 541–546.
- Klarenbach C., Schmirgel H., Krah J.O. Design of fast and robust current controllers for servo drives based on space vector modulation. *PCIM Europe*, Nürnberg, Germany, 2011, pp. 182–188.
- Zhang Q., Shen Q., Tong Q., Qin H. Predictive control for a permanent magnet synchronous motor using automatic tuning Smith-predictor with optimal parameter mismatch. 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China, 2008, pp. 1520–1525.
- 9. Kiesbauer J., Vnucec D., Fuchs J., Konigorski U. *Entkopplung der Regelgrössen in einem Fluidfördersystem mit Totzeit.* Patent EP, no. WO2011120689A1, 2011.
- Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskii G.G. Upravlenie elektroprivodami [Control over electric drives]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 382 p.
- Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. *Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nym upravleniem* [Electromechanical systems with adaptive and model control]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984. 216 p.
- 12. Lebedev A.V., Filaretov V.F. Samonastraivayushchayasya sistema s etalonnoi model'yu dlya upravleniya dvizheniem podvodnogo apparata [Self-adjusting system with a reference model for control of underwater vehicle motion]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 42–52. (In Russian).
- Schroeder D. Elektrische Antriebe, regelung von antriebssystemen. Berlin, Springer, 2009. 1336 p. DOI: 10.1007/978-3-540-89613-5.
- Hsu J.C., Meyer A.U. Sovremennaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya i ee primenenie [Modern control principles and applications]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 544 p. (In Russian).
- 15. Lamsahel H., Zehringer T., Sworowski E. Verfahren und Vorrichtung zur Totzeitkompensation. Patent Germany, no. DE102012111696A1, 2014.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Кромм Андрей Артурович – родился в 1960 году, канд. техн. наук, инженер высшей квалификации в компании Linde Material Handling, GmbH, Ашаффенбург, Германия. Область научных интересов: автоматизированный электропривод постоянного и переменного тока с переменной структурой. Опубликовано более 15 научных работ. (Адрес: 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Депутатская, 60/39. E-mail: galand@gmx.net).

Kromm Andrej Arturovich (b. 1960) – Candidate of Sciences (Eng.), professor, highly qualified engineer at Linde Material Handling, GmbH, Aschaffenburg, Germany. His research interests are currently focused on automated electric drive with a variable structure. He is the author of more than 15 scientific publications. (Address: 60/39, Deputatskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia. E-mail: galand@gmx.net).



Симаков Геннадий Михайлович – родился в 1942 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры ЭАПУ, НГТУ. Область научных интересов: автоматизация систем автоматизированного электропривода. Опубликовано более 150 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: Simakov44_86@mail.ru).

Simakov Gennadiy Mikhailovich (b. 1942) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, professor at Electric Drives and Automation department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on automation of control systems of electric drives. He is the author of more than 150 scientific publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Simakov44_86@mail.ru).



Гусев Андрей Евгеньевич – родился в 1999 году. Закончил обучение в НГТУ. Область научных интересов: теория электропривода, системы управления электроприводом, электроника. Опубликовано две научные работы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: andrey223gg@yandex.ru).

Gusev Andrey Evgenevich (b. 1999) – graduated from Novosibirsk State Technical University. His research interests include electric drive theory, electric drive control systems, and electronics. He is the author 2 scientific publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: andrey223gg@yandex.ru).

Статья поступила 23 ноября 2022 Received November 23, 2022

To Reference:

Kromm A.A., Simakov G.M., Gusev A.E. Vysokodinamichnaya kompensatsiya «mertvogo vremeni» v elektricheskikh privodakh na baze signal'noi adaptatsii [Highly dynamic "Dead time" compensation in electric drives based on signal adaptation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 2 (59), pp. 16–28. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-16-28.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

апрель-июнь

№ 2 (59)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 538.911

2023

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ СКЛАДОК НА ПЛАЗМАТИЧЕСКОЙ МЕМБРАНЕ

П.В. Мокрушников¹, В.Я. Рудяк^{1,2,3}

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) ²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН ³Новосибирский государственный университет

Представлена модель образования складчатости плазматической мембраны под действием приложенных к ней продольных и поперечных механических усилий. Эти усилия возникают из-за изменения белок-липидных и липид-липидных взаимодействий в мембране и подмембранной спектрин-актин-анкириновой сети при их взаимодействии с гормонами стресса, андрогенами и т. п. Используется модель линейно-упругой среды. Установлено, что амплитуда высоты складок прямо пропорциональна амплитуде приложенных распределенных поперечных усилий и обратно пропорциональна продольному напряжению. Показано, что если величина продольного напряжения превысит некоторое критическое значение, то складки мембраны модулируются субскладками. Результаты моделирования объясняют известные данные атомно-силовой микроскопии поверхности мембран эритроцитов при их взаимодействии с гормонами стресса и андрогенами.

Ключевые слова: механические напряжения, моделирование, конденсированная среда, белок-липидные домены, биологические мембраны, конформация биомембран, морфология биомембран.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-29-40

Введение

Плазматические мембраны – это молекулярные структуры, состоящие из липидного бислоя и мембранных белков. Они отделяют содержимое любой клетки от внешней среды, обеспечивая ее целостность, и регулируют обмен между клетками и средой [1]. Мембраны являются элементами мягкого конденсированного вещества (soft matter) живой материи. Под действием внешних условий они могут менять (и меняют) свою структуру, что приводит и к изменениям их морфологии и функций [2, 3]. Под изменением структуры (конформации) плазматических мембран понимается изменение вторичной, третичной и четвертичной структур мембранных белков, фаз липидного бислоя, перераспределение белков и липидов по бислою, изменение морфологии мембран. Плазматические мембраны клеток меняют свою структуру при изменении внешних условий (температуры, рН и т. д.), при взаимодействии с различными лигандами, например, гормонами стресса и андрогенами. В результате происходят изменения белок-липидных и липид-липидных взаимодействий в мембране и в связанной с ней подмембранной спектрин-актин-анкириновой сети. В результате в мембране существенно меняются поля механических напряжений.

Целью данной работы является создание механической модели, описывающей влияние поля механических напряжений в мембране на амплитуды и длины волн образующихся в ней складок. Получен критерий возникновения на складках мембраны субскладок.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Мегагранта Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-2021-575.

^{© 2023} Мокрушников П.В., Рудяк В.Я.

1. Модель образования складок

Мембрана эритроцита является хорошей моделью для изучения любых плазматических мембран [2]. На рис.1 приведена схема участка мембраны [4-9]. Внутренний объем эритроцита обозначен здесь через in, внешнее пространство – out. Показаны находящиеся в липидном бислое (lipid bilaer) мембранные белки гликофорина (Gly), адренорецептор (AR), взаимодействующий с ним G-белок (GP). Белки гликофорина через белок актин крепятся к подмембранной белковой сети из нитей спектрина (цитоскелету). Адренорецептор и G-белок касаются нитей спектрина и могут менять их конформацию.



Puc. 1 – Схема участка плазматической мембраны *Fig.* 1 – Model of the membrane section

Ранее методами атомно-силовой микроскопии показано, что при взаимодействии с гормонами стресса (адреналином, норадреналином, кортизолом) и андрогенами (андростероном, тестостероном, ДЭА, ДЭАС) мембрана эритроцита меняет свою морфологию, покрывается квазипериодическими складками [2, 3]. Гормоны стресса и андрогены при взаимодействии с плазматическими мембранами связываются с адренорецепторами (AR) (рис. 1), меняя их конформацию. В свою очередь эти рецепторы, взаимодействуя непосредственно или через G-белок со спектрин-актин-анкириновой сетью, меняют ее конформацию, и таким образом меняют конформацию мембранных белков гликофоринов, связанных с цитоскелетом через белки актины (рис. 1). В результате нити спектрина сжимаются [2, 3].

Одновременно методами ИК-спектроскопии и флуоресценции установлено, что в этом случае усиливаются связи между мембранными белками и окружающими их липидами. Возрастает упорядоченность липидного бислоя. В мембране появляются белок-липидные домены с более плотной упаковкой липидов в жидко-упорядоченной фазе L_0 или гель-фазе L_β . С другой стороны, между этими доменами липиды находятся в жидко-неупорядоченной фазе L_d [2, 3]. Рис.1 иллюстрирует именно такую ситуацию, имеет место более плотная упаковка фосфолипидов в L_0 фазе около мембранных белков, а между доменами фосфолипиды упакованы менее плотно. В результате происходит деформация липидного бислоя мембраны. Эта деформация не свободная, поскольку мембрана крепится к подмембранной спектрин-актин-анкириновой сети. Наличие этих связей в мембране приводит к изменению поля механических напряжений и на ней появляются складки [2, 3].

Экспериментально in vitro обнаружено, что длина волны складок мембраны эритроцита при ее взаимодействии с разными гормонами принимает значение

100, 200, 300, 400 и 600 нм [2, 3]. Мембранные белки гликофорина, к которым крепится цитоскелет, образуют псевдогексагональную сеть с характерным размером ячейки около 100 нм [2]. Было высказано предположение, что на возникновение складок на поверхности мембран наибольшее влияние оказывает сокращение подмембранной спектрин-актин-анкириновой сети. Для подтверждения этого предположения использовали ингибитор этой сети – цитохалазин В, который снимает сокращение спектрин-актин-анкириновой сети. Действительно, при инкубации эритроцитов с норадреналином на поверхности клеток появлялись складки, при добавлении цитохалазина В к взвеси эритроцитов с норадреналином складки на поверхности мембраны не наблюдались [2].

Ниже формулируется механическая модель образования складок на поверхности мембраны. Сокращения нитей спектрин-актин-анкириновой сети через прикрепленные к ней мембранные белки (рис. 1) создают на внутренней поверхности мембраны механическую поперечную периодически распределенную нагрузку (внешняя сила, отнесенная к единице площади ее поверхности) P_c , направленную внутрь клетки по нормали к плоскости мембраны. Одновременно создается продольное механическое напряжение сжатия в мембране $\sigma_0 = \text{const}$. Кроме этого, существует разность осмотического давления жидкости внутри клетки и снаружи $\Delta P = P_{in} - P_{out}$. При нормальных физиологических условиях P_{in} больше P_{out} , клетка раздувается [2]. Давление на внутренней границе мембраны равно $P_b = P_c - \Delta P$. Знак минус в формуле для P_b возникает из-за того, что давления P_c и ΔP направлены в разные стороны. Мембрана ведет себя подобно пластине с шарнирно закрепленными краями, нагруженной продольной и поперечной механическими нагрузками.



Puc. 2 – Зависимость давления на внутренней границе мембраны от координаты X *Fig.* 2 – Pressure dependence on the X coordinate at the inner membrane boundary

На рис. 2 дана зависимость давления на внутренней границе мембраны от координаты *х*. Ось *X* проведена через мембранные белки (обозначены на рисунке прямоугольниками), прикрепленные к цитоскелету через актины, находящиеся на расстоянии λ друг от друга (сравните с рис. 1). Разные гормоны меняют конформацию подмембранной спектрин-актин-анкириновой сети различным образом, так что длина волны λ может быть равна 100, 200, 300, 400 и 600 нм [2]. Начало оси совпадает с одним из этих мембранных белков. На рис. 2 линия *I* соответствует давлению сети на поверхности мембраны *P_c*, линия *2* определяет разность осмотического давления жидкости внутри клетки и снаружи ($\Delta P = P_{in} - P_{out}$), линия 3 – это давление на внутренней границе мембраны $P_b = P_c - \Delta P$.

Давление сократительной сети P_c приложено к мембранным белкам, находя-

щимся в вершинах гексагональной сети (рис. 1 и 2). Давление P_b является периодической функций координат x (рис. 2). Если разложить ее в ряд Фурье и оставить только первый член, то поперечную механическую распределенную нагрузку на внутренней границе мембраны от координаты x можно представить в виде

$$P_b = P_0 \cos(kx) \,, \tag{1}$$

где P_0 – некоторая константа; $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число (рис. 2).

Складчатость мембраны, наблюдаемая методом атомно-силовой микроскопии [2], образуется при приложении к ней распределенного поперечного усилия и продольного сжимающего усилия. На рис. 3 дана модель распределения механических напряжений на участке мембраны при образовании на ней складок. Здесь ось Z направлена перпендикулярно срединной плоскости мембраны, а оси X и Y – вдоль этой плоскости. Как и на рис. 2, начало оси X совпадает с положением одного из мембранных белков, связанных со спектрин-актин-анкириновой сетью. Координаты x мембранных белков, прикрепленных к цитоскелету, имеют, как и на рис. 2, координаты 0, λ , 2λ и т. д., где λ – расстояние между трансмембранными белками, связанными со спектрин-актин-анкириновой сетью, к которым приложены максимальные усилия, направленные к центру клетки (сравните с рис. 1 и 2).



Puc. 3 – Модель распределения механических напряжений на участке мембраны *Fig. 3* – Model of mechanical stress distribution on the membrane section

На рис. 3 изображена схема, когда $\lambda = 100$ нм. В отличие от рис. 2 эти мембранные белки приподнялись на величину A над срединной плоскостью мембраны. Здесь A – амплитуда складки мембраны. Внутренний объем эритроцита обозначен на рис. 3 через *in*, внешнее пространство – *out*. Здесь l – белок актин, через который спектриновые нити цитоскелета при сжатии создают поперечное усилие на поверхности мембраны P_c , направленное к центру клетки. Прямоугольники 2 – трансмембранные белки, к которым прикреплены нити цитоскелета (сравните с рис. 1 и 2). Давление на внутренней границе мембраны $P_b = P_c - \Delta P$, приведенное на рис. 2.

В нормальных физиологических условиях P_b должна компенсироваться равнодействующей продольных напряжений $\sigma_0 = \text{const}$, действующих на элемент мембраны в поперечном к нему направлении (рис. 3). В рассматриваемой модели высота складки мембраны A не мала по сравнению с толщиной мембраны b, но много меньше размеров эритроцита (рис. 3). Будем считать, что по толщине мембраны механическое напряжение сжатия σ_0 не меняется и от координаты x не зависит. Считаем, что только смещения частиц мембраны вдоль оси X, ℓ_x и вдоль оси Z, $u_z = \xi$ не равны нулю. Эти смещения зависят только от координаты x. Тогда получаем, что следующие компоненты тензора деформаций равны нулю [10]: $u_{yy} = u_{xy} = u_{xz} = u_{yz} = u_{zz} = 0$.

Ненулевые компоненты тензора напряжений имеют вид [10]

$$\sigma_{xx} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} u_{xx} = \sigma_0 = \text{const} < 0 , \quad \sigma_{yy} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_0 , \quad \sigma_{zz} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_0 , \quad (2)$$

где v – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга. Входящая в формулу компонента тензора деформаций при сильном прогибе мембраны определяется соотношением, приведенным в [10]:

$$u_{xx} = \frac{\partial \ell_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2.$$
(3)

Изгиб мембраны ξ и напряжения (2) подчиняются системе уравнений фон Кармана равновесия пластины с приложенными к ней внешними силами [10]:

$$D\frac{d^4\xi}{dx^4} - b\sigma_0 \frac{d^2\xi}{dx^2} = P_b , \ \frac{d\sigma_{xx}}{dx} = 0 , \ \frac{d\sigma_{yy}}{dy} = 0 , \ \frac{d\sigma_{zz}}{dz} = 0 ,$$
(4)

где $D = \frac{Eb^3}{12(1-v^2)}$ – цилиндрическая жесткость мембраны. Второе, третье и чет-

вертое уравнения (4) выполняются согласно (2). Поскольку изгиб мембраны ξ является функцией от одной продольной координаты x, первое уравнение (4) становится обыкновенным линейным неоднородным дифференциальным уравнением. Его решением $\xi(x)$ является сумма общего решения соответствующего однородного уравнения $\xi_0(x) = C_1 \cos k_0 x + C_2 \sin k_0 x$, где C_1 и C_2 константы, и частного решения неоднородного уравнения $\xi_1(x)$. Периодический изгиб мембраныны образует ее складчатость.

Частное решение $\xi_{l}(x)$ дает зависимость высоты складок от координаты x при приложении поперечного усилия (1), а также продольного механического напряжения сжатия в мембране $\sigma_0 = \text{const}$ (рис. 3). Ищем частное решение первого уравнения (4) в виде $\xi_{l}(x) = A \cos kx$, где A = const, тогда для амплитуды складки A из (4) получается соотношение

$$A = \frac{P_0 \lambda^2}{(2\pi)^2} \left[D \frac{(2\pi)^2}{\lambda^2} + b \sigma_0 \right]^{-1}.$$
 (5)

Если продольные напряжения сжатия меньше некоторого критического значения σ_{cr} : $|\sigma_0| < |\sigma_{cr}|$, то $\xi_0(x) = 0$ и высота складок описывается функцией $\xi(x) = \xi_1(x)$ [10]. Но если продольные напряжения сжатия превысят σ_{cr} , на складках, описываемых функцией $\xi_1(x)$, дополнительно возникнут субскладки. Высота субскладок описывается функцией $\xi_0(x) = C_1 \cos k_0 x + C_2 \sin k_0 x$, являющейся решением однородного уравнения (4) [10]. Это решение описывает зависимость высоты таких субскладок мембраны под действием только лишь одного продольного усилия. Входящее сюда волновое число k_0 имеет вид

$$k_0^2 = \frac{b|\sigma_0|}{D}.$$
 (6)

В точках крепления белков сети к мембране смещения мембраны из-за субскладок отсутствуют (рис. 3): $\xi_0(0) = \xi_0(\lambda) = 0$. Это требует $C_1 = 0$. Если продольное напряжение превысит некоторое критическое значение $|\sigma_0| \ge |\sigma_{cr}|$, на складках, описываемых функцией $\xi_1(x)$, возникнут субскладки $\xi_0(x) = C_2 \sin k_0 x$, для которых выполняется соотношение $k_0\lambda = \pi n$, где n – любое натуральное число. В этом случае складка мембраны дополнительно изгибается по n полуволнам синусоиды. При n = 2 складка мембраны дополнительно изгибается в две полуволны с длиной прогиба $\lambda/2$. Если n = 3, то на складке возникает три дополнительные волны прогиба. Из (6) можно определить критические значения продольного напряжения, оно равно

$$\left|\sigma_{cr}\right| = \frac{D\pi^2}{b\lambda^2} n^2.$$
⁽⁷⁾

Таким образом, при приложении к мембране продольных и поперечных усилий она покрывается складками высотой $\xi(x) = A \cos kx$, на которой при достаточно больших продольных напряжениях могут возникнуть субскладки. Высота складок и субскладок равна $\xi(x) = A \cos kx + C_2 \sin k_0 x$. Измерения с помощью атомно-силовой микроскопии действительно фиксируют образование на мембране складок и субскладок на них [2, 3]. Таким образом, данная модель качественно описывает экспериментально наблюдаемую морфологию мембран.

2. Обсуждение результатов

Из уравнений (2), (3) можно получить выражение для смещения молекул мембраны вдоль оси *X*, когда продольные усилия меньше критических: $|\sigma_0| < |\sigma_{cr}|$ (7),

$$\ell_x = C_3 x + \frac{A^2 k}{8} \sin 2kx,\tag{8}$$

где $C_3 = \frac{E(1-\nu)\sigma_0}{(1+\nu)(1-2\nu)} - \left(\frac{Ak}{2}\right)^2.$

При изменении структуры мембран в ней меняется поле механических напряжений, она покрывается складками [2, 3]. Из выражения (8) для смещения ℓ_x следует, что между вершин складок плазматической мембраны происходят
наибольшие продольные смещения ℓ_x молекул мембраны друг от друга (рис. 1, 3). К этим вершинам поле механических напряжений перераспределяет белоклипидные домены с более плотной упаковкой липидов в жидко-упорядоченной фазе L_0 или гель-фазе L_β , оставляя между доменами липиды в жидко-неупорядоченной фазе L_d . Образуется квазипериодическая сеть белок-липидных доменов, связанная с цитоскелетом [2, 3].

Если смещения ℓ_x превысят некоторое критическое значение, мембрана может лопнуть, в ней возникнет трещина. Такие трещины экспериментально наблюдались методом атомно-силовой микроскопии при взаимодействии мембран с кортизолом [2, 11].

Из (5) следует, что амплитуда высоты складок А прямо пропорциональна амплитуде приложенных распределенных поперечных усилий P₀ и обратно пропорциональна продольному напряжению σ_0 . Это качественно объясняет результаты атомно-силовой микроскопии мембран при их взаимодействии с гормонами стресса и андрогенами [2, 3]. Гормоны, которые сильнее меняли конформацию подмембранной спектрин-актин-анкириновой сети, например адреналин и тестостерон, сильнее меняли P_0 из (1) и морфологию мембран [2, 3]. Адреналин связывался с адренорецепторами на поверхности мембраны, взаимодействующими с подмембранной спектрин-актин-анкириновой сократительной сетью. Он вызывал значительные изменения конформации этой сети, так что продольные напряжения сжатия в мембране σ_0 и амплитуда поперечных напряжений растяжения P₀ значительно увеличивались. Это приводило к резкому увеличению амплитуды А складок до 15 нм. На поверхности складок с длиной волны 300 нм и амплитудой до 15 нм появлялись более мелкие субскладки с длиной волны 50 нм и амплитудой 5 нм [2, 3]. Из результатов представленной модели следует, что такие субскладки появляются на основных складках при приложении продольных нагрузок выше критического значения $|\sigma_0| \ge |\sigma_{cr}|$ из формулы (7).

Тестостерон оказывал похожее, как и адреналин, воздействие на структуру мембран. Продольные напряжения сжатия в мембране σ_0 и амплитуда поперечных усилий P₀, создаваемые белковой сетью, также значительно увеличивались. На поверхности складок с длиной волны 400 нм и амплитудой 10-12 нм появлялись более мелкие субскладки с длиной волны 50 нм и амплитудой 5 нм. Появление субскладок также можно объяснить превышением продольного усилия σ_0 критического значения $|\sigma_0| \ge |\sigma_{cr}|$ из формулы (7). Их размеры описываются функцией $\xi_0(x)$. На участке мембраны длиной 400 нм образуется восемь полуволн с n = 8 и длиной 50 нм [2]. Можно оценить величину продольных механических напряжений в мембране, возникающую при ее инкубации с тестостероном по формуле (7). Имеем: модуль Юнга $E = 5 \cdot 10^8 \,\text{H/m}^2$, n = 8, $\lambda = 400 \,\text{нм}$, коэффициент Пуассона v = 0,3, толщина мембраны b = 10 нм. Подставив эти значения в (7), получим, что продольное механическое напряжение в мембране эритроцита $\sigma = 1,75 \cdot 10^7 \, \text{H/m}^2$. Искусственная фосфолипидная мембрана, состоящая только из молекул фосфолипидов, разрушается и перестает быть однослойной при приложении к ней продольного механического напряжения более $\sigma = 8 \cdot 10^6 \, \text{H/m}^2$ [12]. В цитоплазматической мембране механические продольные напряжения сжатия могут достигать больших значений, чем в искусственной фосфолипидной мембране, за счет стабилизирующего действия мембранных белков, связанных с цитоскелетом. Они притягивают к себе окружающие их липиды, создавая вокруг себя белок-липидные домены, не позволяя мембране разрушаться (рис. 1, 3).

При взаимодействии эритроцитов с наночастицами оксидов металлов с размерами больше некоторого критического значения высота складчатости мембраны эритроцита не увеличивалась, а уменьшалась [13–15]. Наночастицы образуют новые ван-дер-ваальсовские гидрофобные водородные связи с молекулами мембраны, повышающие продольные напряжения сжатия в мембране σ_0 . При этом амплитуда поперечных напряжений P_0 не увеличивалась [13–15]. Увеличение только продольного напряжения сжатия σ_0 без увеличения поперечного напряжения высоты складок согласно (5).

Заключение

Таким образом, в данной работе показано, что приложение к мембране распределенного поперечного и продольного сжимающего механических усилий приводит к образованию складок мембраны. Амплитуда высоты складок прямо пропорциональна амплитуде приложенных распределенных поперечных усилий и обратно пропорциональна продольному напряжению. Из модели следует, что если продольные напряжения сжатия превысят некоторое критическое значение σ_{cr} , на складках дополнительно возникнут субскладки. В этом случае каждая складка мембраны изгибается по *n* полуволнам синусоиды. Число *n* этих полуволн зависит от величины поперечного напряжения σ_0 .

Изменение структуры мембран влияет на функции мембран и клеток. Представленная модель важна для понимания механизма влияния изменения структуры мембран на их функции. Можно привести следующие примеры. Появление в мембране в результате структурных переходов неподвижных квазипериодически расположенных белок-липидных доменов, связанных со спектрин-актинанкириновой сетью, объясняет появление различных видов диффузии липидов в мембране, экспериментально наблюдавшихся ранее [16, 17]. Изменение структуры мембран эритроцитов влияет на положение максимума зависимости поверхностного натяжения взвеси эритроцитов от рН [2]. На этом эффекте можно построить диагностику заболеваний, поскольку при некоторых заболеваниях сильно меняется структура мембран эритроцитов, меняется взаимодействие между эритроцитами во взвеси и максимум поверхностного натяжения смещается относительно нормы. При прохождении эритроцита через микрокапиллярную сеть и альвеолы легких сжимающие поперечные механические напряжения резко увеличиваются. В углеводородных цепях фосфолипидов появляются кинкисолитоны, создающие дополнительный перенос молекул газа через мембрану [18].

На примере мембран эритроцитов было показано, что переход липидов в белок-липидных доменах из менее упорядоченной фазы L_d в более упорядоченную L_o влияет на активность их Na⁺,K⁺-АТФаз через изменение поля механических напряжений в мембране [2]. Изменение структуры мембран эритроцитов влияет на их прохождение по микрокапиллярам из-за изменения электростатического взаимодействия между ними и стенками микрососудов [2]. Измерение перфузии изолированного сердца крысы методом Лангендорфа показало, что при взаимодействии адреналина с мембранами эритроцитов в сердце может возникнуть остановка движения крови (стаз). Стаз возникает из-за закупорки микрососудов эритроцитами, мембраны которых стали более жесткими из-за структурных изменений и уменьшения активности их Na⁺,K⁺-ATФаз, что уменьшает энергию отталкивания между эритроцитами [2].

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Биохимия: учебник / под ред. Е.С. Северина. М.: Гэотар-Мед, 2004. 779 с.
- Структурные переходы в мембранах эритроцитов (экспериментальные и теоретические модели) / П.В. Мокрушников, Л.Е. Панин, В.Е. Панин, А.И. Козельская, Б.Н. Зайцев. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2019. 286 с.
- 3. **Mokrushnikov P.V.** Mechanical stresses in the lipid bilayer of erythrocyte membranes // Lipid bilayers: properties, behavior and interactions / ed. by M. Ashrafuzzaman. – New York: Nova Science Publishers, 2019. – P. 43–91.
- Combined effect of cortical cytoskeleton and transmembrane proteins on domain formation in biomembranes / K.U. Sikder, K.A. Stone, P.B.S. Kumar, M. Laradji // The Journal of Chemical Physics. – 2014. – Vol. 141 (5). – P. 054902.
- 5. Строение и функция эритроцита в норме и при критических состояниях / В.В. Мороз, А.М. Голубев, А.В. Афанасьев, А.Н. Кузовлев, В.А. Сергунова, О.Е. Гудкова, А.М. Черныш // Общая реаниматология. 2012. Т. 8, № 1. С. 52–60.
- Revealing plasma membrane nano-domains with diffusion analysis methods / J.L. Kure, C.B. Andersen, K.I. Mortensen, P.W. Wiseman, E.C. Arnspang // Membranes (Basel). – 2020. – Vol. 10 (11). – P. 314–325.
- Mitre-Aguilar I.B., Cabrera-Quintero A.J., Zentella-Dehesa A. Genomic and nongenomic effects of glucocorticoids: implications for breast cancer // International Journal of Clinical and Experimental Pathology. – 2015. – Vol. 8 (1). – P. 1–10.
- 8. Chichili G.R., Rodgers W. Cytoskeleton-membrane interactions in membrane raft structure // Cellular and Molecular Life Sciences: CMLS. 2009. Vol. 66 (14). P. 2319–2328.
- Huesties W.H., McConnel H.M. A functional acetylcholine receptor in the human erythrocyte // Biochemical and Biophysical Research Communications. – 1974. – Vol. 57 (3). – P. 732–762.
- 10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.
- Основы многоуровневой мезомеханики наноструктурных переходов в мембранах эритроцитов и их разрушения при взаимодействии с гормонами стресса / Л.Е. Панин, П.В. Мокрушников, В.Г. Куницин, В.Е. Панин, Б.Н. Зайцев // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 5–17.
- 12. Рубин А.Б. Биофизика. Т. 2: учебник для вузов. М.: Наука, 2004. 469 с.
- Взаимодействие нанокристаллов корунда и кварца с мембранами эритроцитов / П.В. Мокрушников, Л.Е. Панин, Б.Н. Зайцев, Н.С. Доронин, А.И. Козельская, А.В. Панин // Биофизика. – 2011. – Т. 56, № 6. – С. 1105–1110.
- Morphological changes of the red blood cells treated with metal oxide nanoparticles / A.I. Kozelskaya, A.V. Panin, I.A. Khlusov, P.V. Mokrushnikov, B.N. Zaitsev, D.I. Kuzmenko, G.Yu. Vasyukov // Toxicology in Vitro. – 2016. – Vol. 37. – P. 34–40.
- 15. Мокрушников П.В. Механизм взаимодействия наночастиц оксидов металлов с биомембраной // Биофизика. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 74–79.
- Confined diffusion of transmembrane proteins and lipids induced by the same actin meshwork lining the plasma membrane / T.K. Fujiwara, K. Iwasawa, Z. Kalay, T.A. Tsunoyama, Y. Watanabe, Y.M. Umemura, H. Murakoshi, K.G.N. Suzuki, Y.L. Nemoto, N. Morone, A. Kusumi // Molecular Biology of the Cell. – 2016. – Vol. 27 (7). – P. 1101– 1119.
- 17. Мокрушников П.В., Рудяк В.Я. Модель диффузии липидов в цитоплазматических мембранах // Биофизика. 2023. Т. 68, № 1. С. 41–56. DOI: 10.31857/ S0006302923010052.
- Mokrushnikov P.V., Rudyak V.Ya., Lezhnev E.V. Mechanism of gas molecule transport through erythrocytes' membranes by kinks-solitons // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2021. – Vol. 12, N 1. – P. 22–31.

A MECHANICAL MODEL OF FOLD FORMATION ON THE PLASMA MEMBRANE

Mokrushnikov P.V.¹, Rudyak V.Ya.^{1,2,3}

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia ²Institute of Thermophysics, Novosibirsk, Russia ³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

A model of plasma membrane folding formation under the action of longitudinal and transverse mechanical forces applied to it is presented. These forces arise due to changes in proteinlipid and lipid-lipid interactions in the membrane and the submembrane spectrin-actin-ankyrin network under changing external conditions (temperature, pH), and interaction with ligands. A model of a linear elastic continuum is used. It is established that the amplitude of the height of folds is directly proportional to the amplitude of the applied distributed transverse forces and inversely proportional to the longitudinal stress. It is shown that if the value of the longitudinal stress exceeds a certain critical value, then the membrane folds are modulated by subfolds. The distributed transverse force has the same wavelength as the membrane folds. The results of modeling at a qualitative level explain the results of atomic force microscopy of the surface of erythrocyte membranes during their interaction with stress hormones and androgens.

Keywords: structural changes in biological membranes, protein-lipid domains in biomembranes, morphology of biomembranes.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-29-40

REFERENCES

- 1. Severin E.S., ed. Biokhimiya [Biochemistry]. Moscow, Geotar-Med Publ., 2004. 779 p.
- Mokrushnikov P.V., Panin L.E., Panin V.E., Kozel'skaya A.I., Zaitsev B.N. Strukturnye perekhody v membranakh eritrotsitov (eksperimental'nye i teoreticheskie modeli) [Structural transitions in erythrocyte membranes (experimental and theoretical models)]. Novosibirsk, Sibstrin Publ., 2019. 286 p.
- Mokrushnikov P.V. Mechanical stresses in the lipid bilayer of erythrocyte membranes. *Lipid bilayers: properties, behavior and interactions*. Ed. by M. Ashrafuzzaman. New York, Nova Science Publishers, 2019, pp. 43–91.
- Sikder K.U., Stone K.A., Kumar P.B.S., Laradji M. Combined effect of cortical cytoskeleton and transmembrane proteins on domain formation in biomembranes. *The Journal of Chemical Physics*, 2014, vol. 141 (5), p. 054902.
- Moroz V.V., Golubev A.M., Afanasyev A.V., Kuzovlev A.N., Sergunova V.A., Gudkova O.E., Chernysh A.M. *Stroenie i funktsiya eritrotsita v norme i pri kriticheskikh sostoyaniyakh* [The structure and function of a red blood cell in health and critical conditions]. *Obshchaya reanimatologiya = General Reanimatology*, 2012, vol. 8 (1), pp. 52–60.
- Kure J.L., Andersen C.B., Mortensen K.I., Wiseman P.W., Arnspang E.C. Revealing plasma membrane nano-domains with diffusion analysis methods. *Membranes (Basel)*, 2020, vol. 10 (11), pp. 314–325.
- Mitre-Aguilar I.B., Cabrera-Quintero A.J., Zentella-Dehesa A. Genomic and non-genomic effects of glucocorticoids: implications for breast cancer. *International Journal of Clinical* and Experimental Pathology, 2015, vol. 8 (1), pp. 1–10.
- 8. Chichili G.R., Rodgers W. Cytoskeleton-membrane interactions in membrane raft structure. *Cellular and Molecular Life Sciences: CMLS*, 2009, vol. 66 (14), pp. 2319–2328.
- Huesties W.H., McConnel H.M. A functional acetylcholine receptor in the human erythrocyte. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 1974, vol. 57 (3), pp. 732– 762.
- 10. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika*. T. 7. *Teoriya uprugosti* [Theoretical Physics. Vol. 7. Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 246 p.

- Panin L.E., Mokrushnikov P.V., Kunitsin V.G., Panin V.E., Zaitsev B.N. Osnovy mnogourovnevoj mezomekhaniki nanostrukturnyh perekhodov v membranah eritrocitov i ih razrusheniya pri vzaimodejstvii s gormonami stressa [Fundamentals of multilevel mesomechanics of nanostructural transitions in erythrocyte membranes and their destruction in interaction with stress hormones]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2011, vol. 14 (1), pp. 5–17. (In Russian).
- 12. Rubin A.B. Biofizika. T. 2 [Biophysics. Vol. 2]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 469 p.
- Mokrushnikov P.V., Panin L.E., Doronin N.S., Zaitsev B.N., Kozelskaya A.I., Panin A.V. Vzaimodeistvie nanokristallov korunda i kvartsa s membranami eritrotsitov [Interaction of corundum and quartz nanocrystals with erythrocyte membranes]. *Biofizika = Biophysics*, 2011, vol. 56 (6), pp. 1105–1110. (In Russian).
- 14. Kozelskaya A.I., Panin A.V., Khlusov I.A., Mokrushnikov P.V., Zaitsev B.N., Kuzmenko D.I., Vasyukov G.Yu. Morphological changes of the red blood cells treated with metal oxide nanoparticles. *Toxicology in Vitro*, 2016, vol. 37, pp. 34–40.
- Mokrushnikov P.V. Mekhanizm vzaimodeistviya nanochastits oksidov metallov s biomembranoi [A mechanism of the interaction of metal oxide nanoparticles with biological membranes]. *Biofizika = Biophysics*, 2020, vol. 65 (1), pp. 63–67. (In Russian).
- Fujiwara T.K., Iwasawa K., Kalay Z., Tsunoyama T.A., Watanabe Y., Umemura Y.M., Murakoshi H., Suzuki K.G.N., Nemoto Y.L., Morone N., Kusumi A. Confined diffusion of transmembrane proteins and lipids induced by the same actin meshwork lining the plasma membrane. *Molecular Biology of the Cell*, 2016, vol. 27 (7), pp. 1101–1119.
- Mokrushnikov P.V., Rudyak V.Ya. Model of lipid diffusion in cytoplasmic membranes. *Biophysics*, 2023, vol. 68 (1), pp. 31–43. doi: 10.1134/S0006350923010128. Translated from *Biofizika*, 2023, vol. 68 (1), pp. 41–56. DOI: 10.31857/S0006302923010052.
- Mokrushnikov P.V., Rudyak V.Ya., Lezhnev E.V. Mechanism of gas molecule transport through erythrocytes' membranes by kinks-solitons. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2021, vol. 12 (1), pp. 22–31.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Мокрушников Павел Валентинович – родился в 1964 году, в 1986 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «физик», канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики и химии Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета. Область научных интересов: структурные переходы в плазматических мембранах. Автор и соавтор 29 научных работ, в том числе одной монографии. (Адрес: 630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113. E-mail: pavel.mokrushnikov@bk.ru).

Mokrushnikov Pavel Valentinovich (b. 1964) – Candidate of Sciences (Phys. & Math.), associate professor at the Department of Physics and Chemistry in the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. His research interests are currently focused on structural transitions in plasma membranes. He is the author of 29 scientific papers. (Address: 113, Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russia. E-mail: pavel.mokrushnikov@bk.ru).



Рудяк Валерий Яковлевич – родился в 1945 году, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, кафедра теоретической механики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета. Области научных интересов: кинетическая теория плотных и разреженных газов, неравновесная статистическая механика процессов переноса, физика и механика дисперсных жидкостей, процессы переноса в газах, жидкостях и в наножидкостях, теория ламинарно-турбулентного перехода, моделирование и изучение макро-, микро- и нанотечений ньютоновских и неньютоновских жидкостей. Опубликовано более 500 научных работ. (Адрес: 630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113. E-mail: valery.rudyak@mail.ru). **Rudyak Valery Yakovlevich** (b. 1945) – Doctor of Sciences (Phys. & Math.), professor, chief researcher, Theoretical Mechanics Department of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. His research interests are currently focused on the kinetic theory of dense and rarefied gases, nonequilibrium statistical mechanics of transfer processes, physics and mechanics of dispersed liquids, transfer processes in gases, liquids and nanofluids, the theory of laminar-turbulent transition, modeling and study of macro-, micro- and nanotreams of Newtonian and non-Newtonian liquids. He is the author of 500 scientific papers. (Address: 113, Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russia. E-mail: valery.rudyak@mail.ru).

Статья поступила 17 мая 2023 г. Received May 17, 2023

To Reference:

Mokrushnikov P.V., Rudyak V.Ya. Mekhanicheskaya model' obrazovaniya skladok na plazmaticheskoi membrane [A mechanical model of fold formation on the plasma membrane]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 2 (59), pp. 29–40. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-29-40.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

апрель-июнь

№ 2 (59)

УДК 214.74

2023

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ В СИСТЕМАХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Д.А. Устинов, А.Р. Аисар

Санкт-Петербургский горный университет

Современные тенденции развития систем электроснабжения промышленных объектов при применении принципов распределенной генерации заключаются в осуществлении электроснабжения от нескольких источников питания разных типов и характеристик (фотоэлектрические элементы, ветроэнергетические установки, микротурбинные установки, дизельные электростанции), максимальном приближении источников питания к электрическим нагрузкам, применении накопителей электроэнергии. Наличие таких установок вблизи потребителей снижает количественное потребление энергии за счет снижения технических потерь вырабатываемой энергии и снижения зависимости от ископаемых видов топлива. Однако, при наличии этих преимуществ распределенная генерация создала технические проблемы, одной из которых является усложнение систем релейной защиты в связи с возможностью питания точки повреждения с разных сторон. Данное обстоятельство требует разработки новых алгоритмов и схем защиты для обеспечения селективности и повышения чувствительности действия релейной защиты. Цель исследования: выполнить анализ алгоритмов работы дистанционной защиты в системах распределенной генерации. Методы: используется комплексный подход, включающий научный анализ, обработку и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований в области релейной защиты электротехнических комплексов в сетях с распределенной генерацией. Результаты: выполнен анализ различных алгоритмов реализации защиты, которые были реализованы в качестве предложений для распределительных сетей. Представлена система дистанционной защиты в сетях, содержащих системы распределенной генерации, и проведено сравнение алгоритмов работы для повышения чувствительности устройств дистанционной защиты к случаям возникновения различных аварийных режимов: однофазных, трехфазных коротких замыканий. Рассмотрено несколько алгоритмов повышения чувствительности дистанционной защиты для распределительных сетей при наличии нескольких источников питания. Выполнено сравнение этих алгоритмов по критериям стоимости реализации, точности реализации, количества необходимых входных данных. Практическая значимость: результаты исследований могут быть использованы при учете влияния изменения параметров защищаемых присоединений в условиях работы электротехнических комплексов в сети с распределенной генерацией на эффективность действия дистанционной защиты. Они позволяют повысить чувствительность и селективность функционирования дистанционной защиты при возникновении аварийных ситуаций.

Ключевые слова: энергия, распределенная генерация (Рг), алгоритмы действия защиты, распределительные сети, дистанционная защита.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-41-55

Введение

Значительные запасы нефти, газа и угля и их доступность предопределили собственную российскую модель развития энергетики. Таким образом, установленная мощность возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в России, кроме гидроэлектростанций (ГЭС), практически полностью состоит из ветроэлектрических станций (ВЭС) и фотоэлектрических станций (ФЭС) и составляла 1,12 % в 2021 г. Аналогичный показатель для Германии составляет 60,1% (все виды ВИЭ) и 54 % (только ВЭС и ФЭС). Однако изменения в структуре энергетического

© 2023 Устинов Д.А., Аисар А.Р.

комплекса в последние годы стали более заметными: так, в 2020 г., впервые за 5 лет, произошло снижение суммарной установленной мощности тепловых электростанций (на 1320 МВт), что почти равно росту установленной мощности ВИЭ (на 1207 МВт). Следует отметить, что в целом энергетический комплекс России является низкоуглеродным, так как более половины установленной мощности энергосистем приходится на гидроэнергетику и атомные электростанции [1]. Последними тенденциями развития систем электроснабжения промышленных объектов при применении принципов распределенной генерации является реализация электроснабжения от нескольких источников энергии разных типов и характеристик (фотоэлектрические элементы, ветряные электростанции, микротурбинные установки, дизельные электростанции), максимальное приближение источников питания к электрическим нагрузкам, использование накопителей энергии [6]. Наличие таких установок вблизи потребителей снижает количественное потребление энергии за счет минимизации технических потерь на вырабатываемую энергию и снижения зависимости от ископаемого топлива. Однако при этих преимуществах распределенная генерация вызвала технические проблемы, одной из которых является сложность реализации систем релейной защиты из-за возможности питания места КЗ с разных сторон. Наиболее эффективным способом решения этих проблем является построение систем управления с использованием методов моделирования [2]. Это обстоятельство требует разработки новых алгоритмов и схем защиты для обеспечения селективности и повышения чувствительности релейной защиты.

1. Дистанционная защита

Дистанционная защита является одной из распространенных токовых защит, применяемых для защиты распределительных сетей от коротких замыканий [8].

Дистанционная защита основана на оценке полного сопротивления линии путем сравнения тока, проходящего через реле, и напряжения в точке установки реле [7]. Длина защищаемого участка обычно делится на три зоны или более. Каждая зона покрывает часть защищаемого участка, основного или резервируемого. Например, зона l обычно покрывает около 85 % длины линии от шины A до шины B. Зона 2 охватывает всю длину линии, соединяющей шину A и шину B, плюс часть длины следующей линии и так далее для оставшейся зоны, как показано на рис. 1.



 $Puc \ l$ – Дистанционные зоны релейной защиты для радиальной системы [7] *Fig. l* – Remote relay protection zones for a radial system

Дистанционное реле, расположенное на шине A, измеряет напряжение (U) и ток (I) на базовой частоте через трансформатор напряжения (TV) и трансформатор тока (TA) соответственно. Полное сопротивление реле составляет:

$$Z_R = \frac{U_R}{I_R};\tag{1}$$

$$U_R = I_R \alpha Z_{\text{line}} \,, \tag{2}$$

где U_R и I_R – значения напряжения и тока, измеренные реле; α представляет расстояние между точкой реле и точкой повреждения; Z_{line} – полное сопротивление защищаемой линии. Значение полного сопротивления Z_R для короткого замыкания на F_1 равно

$$Z_R = \alpha Z_{\text{line}\,AB}\,,\tag{3}$$

а при коротком замыкании в F₂

$$Z_R = Z_{\text{line }AB} + \alpha Z_{\text{line }BC}.$$
(4)

2. Дистанционная защита в системе с распределенной генерацией и эффект питания

Эффект питания приводит к тому, что полное сопротивление, воспринимаемое реле, оказывается больше, чем фактическое сопротивление прямой последовательности между реле и точкой повреждения, что может привести к снижению чувствительности действия защиты. Для каждой системы Z_A , Z_B и Z_C – полное сопротивление прямой последовательности линии; I_S , I_1 , I_2 , ..., I_n – токи в ветвях распределительной сети [7].

Радиальный распределительный фидер с источником генерации на шине *В* показан на рис. 2. В случае трехфазного короткого замыкания на шине *С* измеренное напряжение ДЗ на шине *А* составляет

$$U_A = I_S Z_A + (I_S + I_1) Z_B.$$
(5)

Полное сопротивление прямой последовательности до места повреждения, измеренное ДЗ, составляет:

$$Z_{DR} = Z_A + \left(1 + \frac{I_1}{I_S}\right) Z_B;$$

$$Z_{DR} = Z_A + Z_B + KZ_B,$$
(6)

где *К* определяется как постоянная питания ($K = I_1/I_S$). Основываясь на уравнении (6), ДЗ при шине *А* измеряет сопротивление, превышающее фактическое сопротивление между шиной *А* и местом короткого замыкания. Дополнительное сопротивление KZ_B влияет на работу ДЗ, снижая чувствительность.

На рис. 2, δ к одной шине подключено более одной линии РГ.

$$U_A = I_S Z_A + (I_S + I_1 + I_2 + \dots + I_n) Z_B.$$
(7)



Рис. 2 – Схемы электроснабжения с объектами распределенной генерации: *a* – радиальный распределительный фидер с одним объектом РГ; *б* – радиальный распределительный фидер с *n* объектами РГ, подключенными к одной шине

Fig. 2 – Power supply schemes with distributed generation facilities: a - a radial distribution feeder with one RG facility; b - a radial distribution feeder with nRG facilities connected to one bus

Сопротивление прямой последовательности линии до точки повреждения, определяемое ДЗ, составляет:

$$Z_{DR} = Z_A + \left(1 + \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_n}{I_S}\right) Z_B =$$

= $Z_A + Z_B + K_n Z_B,$ (8)

где K_n – константа питания ($K = (I_1 + I_2 + ... + I_n)$); n – количество объектов РГ, подключенных к шине B.

На рис. 3 показана зависимость сопротивления, определяемого дистанционной защитой, от расстояния до точки короткого замыкания для схемы рис 2, *a*. Понятно, что эффект питания изменяет измеренное сопротивление ДЗ на шине *A*. Сопротивление, измеренное ДЗ для схемы, показанной на рис. 3, *a*, для двух разных конфигураций, представлено на рис. 3, *б*. Если в системе нет объектов РГ, сопротивление, определяемое ДЗ, равно фактическому сопротивлению линии, которое пропорционально наклону отрезка A'B' на рис. 3. Интеграция объектов РГ в систему приводит к изменению сопротивления, определяемого ДЗ, которое пропорционально наклону отрезка линии B'D'. Уравнения (9) и (10) представляют сопротивления, определяемые ДЗ, на основе наклона отрезков линии на рис. 3, *б*:

$$Z_{DR,AB} = m_{AB}d = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}d,$$
(9)

где $Z_{DR,AB}$ – измеренное сопротивление ДЗ, если короткое замыкание происходит в линии AB; m_{AB} – наклон линии A'B'; d – расстояние от места расположения реле до точки повреждения.

Если в линии *BC* возникает короткое замыкание, то сопротивление, определяемое ДЗ, может быть рассчитано как

$$Z_{DR,BC} = m_{BC}d = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}d , \qquad (10)$$

где Z_{DR.BC} – измеренное полное сопротивление линии, которое видит ДЗ на



Рис. 3 – Зависимость сопротивления, определяемого дистанционной защитой, от расстояния до точки короткого замыкания [7]



Fig. 3 – The dependence of the resistance determined by the remote protection on the distance to the short circuit point [7]

шине A из-за неисправности на линии BC; m_{BC} – это наклон линии BC.

Рис. 4 – Влияние увеличения тока питания на сопротивление дистанционной защиты



3. Способы повышения чувствительности ДЗ

Из-за эффекта мощности, вызванного одним или несколькими источниками питания, распределенными между основным источником и местом повреждения, сопротивление прямой последовательности, измеренное дистанционной защитой, не является фактическим сопротивлением последовательности, как было показано в [2, 3, 9]. Выполним анализ алгоритмов работы дистанционной защиты для распределительных сетей при наличии нескольких источников питания, обеспечивающих повышение селективности и чувствительности действия защиты. Это обстоятельство определяет особую актуальность в условиях комбинированного электроснабжения на основе параллельной работы централизованных и автономных источников распределенной генерации [5].

3.1. Первый способ

Для этого способа требуются следующие данные: 1) значение измеренного сопротивления в месте расположения реле; 2) знание мест расположения объектов РГ; 3) параметры линий эектропередач.

В первом случае линия электропередачи содержит один источник питания, как показано на рис. 2. Уравнение сопротивления линии можно записать как функцию от расстояния:

$$Z_{DR} = md, \quad d = Z_{DR}/m. \tag{11}$$

Предполагается, что координаты подстанции составляют $(x_1, y_1) = (0, 0)$, поскольку ДЗ находится на шине 1. Местоположение координаты РГ1 составляют (x_2, y_2) , где x_2 представляет расстояние от местоположения ДЗ до шин 2 с объектом РГ1, а y_2 представляет фактическое полное сопротивление линии прямой последовательности от шин 1 с ДЗ до шин 2. Расстояние x_3 от места ДЗ до шины 3 известно, но из-за эффекта питания полное сопротивление y_3 не равно сопротивлению прямой последовательности до шины 3. Следовательно, полное сопротивление y_3 может быть определено с использованием следующего уравнения:

$$Z_{DR} = Z_A + (1 + K_1)Z_B + (1 + K_2)Z_C,$$

где Z_A , Z_B и Z_C – фактические сопротивлении линии прямой последовательности; K – постоянная питания $K_1 = I_1/I_S$.

Шаги для корректировки истинного значения сопротивления Z_{DR} будут следующими.

- Расчет сопротивления в месте короткого замыкании для данной системы.
- Расчет тока короткого замыкания.
- Расчет вкладов от каждого источника в значение тока короткого замыкания.

• Фактическое сопротивление линии может быть найдено с помощью уравнения линии с учетом конфигурации схемы и наличия объектов РГ.

3.2. Второй способ

Способ 2 основан на построении двух зависимостей сопротивления от расстояния (ID Impedance, Distance, Импеданс, расстояние). Первая ID-кривая (ID-кривая 1) представляет соотношение между сопротивлением и расстоянием между шиной 1, на которой установлена ДЗ, и точкой КЗ с учетом влияния объектов РГ, а вторая ID-кривая (ID-кривая 2) представляет собой аналогичную первой зависимость, но без учета влияния объектов РГ. Зависимости сопротивления от расстояния должны быть сгенерированы в автономном режиме и сохранены в ДЗ. Хранение данных и автономных учетных записей (даже онлайн-учетных записей, если необходимо) несложно на современных реле с большой памятью. Чтобы найти фактическое сопротивление линии Z_{act} , нужно измеренное значение

сопротивления Z_{meas} сравнить с ID кривой 1, чтобы найти значение, соответствующее расстоянию. Затем значение расстояния сравнивается с ID кривой 2, чтобы получить Z_{act} .

3.3. Третий способ

Преимущество этого способа в том, что он не требует каких-либо автономных вычислений и основан только на локальных измерениях. Также требуется знание местоположения источника питания и его параметров. Эти данные вместе с параметрами линии, которые обычно известны и хранятся в РЗ как «входные данные», используются для иллюстрации принципа этого способа. На рис. 5 показаны расчетная схема и эквивалентная ей схема.



Puc. 5 – Расчетная схема (a), эквивалентная схема (δ) [7] *Fig.* 5 – Calculation scheme (a), equivalent scheme (b) [7]

Система, показанная на рис. 5, состоит из двух источников на шинах 1 и 2. Основной источник *SA*, подключенный к шине 1, и второй источник *SB*, подключенный к шине 2. Мощность источника *SB* может быть соизмерима с мощностью источника *SA* либо отличаться, как в большую, так и в меньшую сторону [2]. Рассмотрим случаи трехфазного и однофазного коротких замыканий

Трехфазное короткое замыкание

Токи замыкания от источников *SA* и *SB* вносят вклад в общий ток замыкания, и поскольку замыкание симметрично, каждый ток замыкания является током прямой последовательности. Этапы способа можно описать следующим образом.

1. Преобразование расчетной схемы: заменяем реальные источники питания идеальными источниками с ЭДС E_{SA} и E_{SB} и внутренним сопротивлением Z_A^+

и Z_B^+ .

2. Определение тока трехфазного короткого замыкания.

3. Определение фактического сопротивления до точки короткого замыкания:

$$x = \frac{Z_{DR \ act}}{Z1^{+} + Z2^{+}}.$$
 (12)

Однофазное короткое замыкание на землю SLG (Phase failure with the ground)

Замыкание SLG является наиболее частым повреждением в электрических сетях и является несимметричным. Этапы определения сопротивления аналогичны случаю трехфазного короткого замыкания, только необходимо учитывать сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательности [7].

3.4. Четвертый способ с быстрым дискретным преобразованием Стоквелла

В [14] алгоритм обнаружения неисправности основан на быстром дискретном преобразовании Стоквелла **FDST (Fast Discrete Stockwell Transform)**, что позволяет улучшить функции дистанционной токовой защиты и устранить недостатки при отказе в системах с распределенной генерацией.

3.4.1. Расчет FDST

Предельные параметры для обнаружения неисправности задаются с помощью уравнений, связанных с быстрым дискретным преобразованием Стоквелла частотно-временного сигнала модулей дистанционной защиты, таких как обнаружение направления, выбор фазы и расчет сопротивления, что важно для селективности защиты.

Быстрое дискретное преобразование Стоквелла FDST дискретного временного ряда x[kT], k = 1,...,N, соответствующего текущего сигнала x(t), где интервал дискретизации равен T, может быть выражено в виде

$$S_{\left(jT,\frac{\pi}{NT}\right)} = \sum_{m=1}^{N} [H^{\circ}W] e^{i2\pi m j/N},$$
(13)

где n = 1,..., N-1 и m = 1,..., (N/2) представляют время и индексы частотных точек данного цикла [6]. Матрица H представляет собой повернутую матрицу, полученную в результате FFT (Fast Fourier Transform, быстрое преобразование Фурье), примененного к x[kT]. Матрица разбита на N локализованных векторов в виде

$$H_{M \times N} = \begin{vmatrix} X_2 & \dots & X_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{M+1} & \dots & X_M \end{vmatrix},$$
 (14)

где M равно N/2. Член W в (13) представляет собой модифицированное двумерное (2D) окно Гаусса [7], приобретающее локализацию в частотной и временной областях. Окно 2D Gaussian определяется как

$$W_{(m,n)} = e^{T_1} + e^{T_2}, (15)$$

где

$$T_1 = -\frac{2\pi^2 (n-1)^2 F}{(a+bm^c)^2};$$
(16)

$$T_2 = \frac{2\pi^2 (N - n + 1)^2 F}{(a + bm^c)^2} \,. \tag{17}$$

В приведенном выше уравнении F – коэффициент окна; b – коэффициент масштабирования, который управляет числом колебаний в окне; a и c являются положительными константами. Значение параметра c, которое варьируется от 0 до 1, способствует захвату затухающих скрытых частот; N – смещенное гауссово окно, используемое в качестве фильтра для уменьшения вычислительной нагрузки дискретного S-преобразования путем фильтрации нежелательной частотной информации [8]. Чтобы получить оконную частотно-временную информацию,

составная матрица *H* умножается на 2D, гауссовский матричный элемент окна. Итак, *G* – это произведение матрицы *H* и *W*:

$$G = H^{\circ}W. \tag{18}$$

3.4.2. Энергия быстрого дискретного преобразования Стоквелла

S-энергия может быть вычислена матрицей FDST из выражения

$$S_{\text{Energy}(t)} = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} \left| S^{\wedge} 2_{(m,n)} \right|.$$
(19)

В установившихся условиях *S*-энергия (*S*_{Energy}) представляет собой почти постоянный сигнал; однако она резко возрастает в переходных условиях. *S*-энергия является подходящим индикатором различных нарушений, включая отказы.

Сравнение рассмотренных способов

Каждый из предложенных способов имеет свои достоинства и недостатки [9]. Для выяснения различий выполнено сравнение рассмотренных способов, сопоставлены различные особенности, включая совокупность необходимых расчетных данных, сложность расчета, стоимость реализации и точность результатов.

1. Необходимые данные и расчеты. Все рассмотренные способы требуют локальных измерений и системных данных для определения места повреждения. В дополнение к системным данным и локальным измерениям первый и второй способы требуют результатов автономных расчетов для определения места неисправности. Первый способ требует вычисления текущих значений в составе данных, которые должны храниться в ДЗ. Точно так же второй способ требует учета неподключенных источников питания для построения кривых (расстояние – сопротивление). Третий способ отличается от других тем, что не требует какихлибо офлайн-расчетов, а его функция полностью зависит от локальных измерений, четвертый способ требует локальных измерений и системных данных, но характеризуется вычислительной сложностью, несмотря на точность результатов.

2. Стоимость. Способы, предложенные в статье, не требуют добавления каких-либо измерительных или коммуникационных устройств и, следовательно, не требуют дополнительных затрат на устройства.



Рис. 6 – ДЗ схема аварийного восстановления с использованием двух зон защиты и мест повреждения [7]

Fig. 6 – *DZ* emergency recovery scheme using two protection zones and damage sites [7]

3. Точность результатов. Одним из наиболее важных показателей любого способа является его точность. Рассмотренные способы выполнения ДЗ были реализованы с использованием программ моделирования, таких как Matlab и PSCADTM EMTDCTM. Результаты подтвердили способность способов локализовать дефекты с высокой точностью при наличии эффекта питания. Третий способ оказался наименее точен, так как полностью зависит от онлайн-измерений, но снижение точности может быть компенсировано другими его преимуществами.

Исследование выполнено для первых трех рассмотренных способов. Были определены показания реле ДЗ при возникновении однофазного и трехфазного короткого замыкания в разных зонах действия защиты [7].

Результаты исследований обобщены в табл. 2. Сопротивление приведено в относительных единицах (pu) на основе величины положительного последовательного сопротивления.

Канал распределения Z_{act} представляет собой фактическое значение сопротивления прямой последовательности; Z_{m1} , Z_{m2} и Z_{m3} – сопротивления, измеренные по предлагаемым способам 1–3 соответственно.

Таблица 1 / Table 1

Предлагаемые	Необходимые	Стоимость	Точность
способы	данные и расчеты		результатов
Способ 1	Местные измерения	Очень низкая	Очень высокая
	Системные данные		
	Офлайн-расчеты		
Способ 2	Местные измерения	Очень низкая	Очень высокая
	Системные данные		
	Офлайн-расчеты		
Способ 3	Местные измерения	Очень низкая	Высокая
	Системные данные		
Способ 4	Местные измерения	Низкая	Очень высокая
	Системные данные		
	Офлайн-расчеты		

Сравнение предложенных способов Comparison of the proposed methods

Таблица 2 / Table 2

Рабочие характеристики дистанционных реле [7]

Operating characteristics of remote relays [7]

Тип повреждения	Место повреждения	Зона защиты	Z _{act}	Z_c	Z_{m1}	Z_{m2}	Z_{m3}
3LG	F1	1	04	0.4	0.4	0.4	0.4
3LG	F2	1	0,7	2,39	0,7	0,7	0,7
3LG	F3	2	1.0	5,26	1,0	1,0	1,0
3LG	F4	Вне зон	1,4	9,09	1,4	1,4	1,4
SLG	F1	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
SLG	F2	1	0,7	3,69	0,7	0,7	0,68
SLG	F3	2	1,0	8,49	1,0	1,0	1,01
SLG	F4	Вне зон	1,4	1,.84	1,4	1,4	1,48

Заключение

Увеличение количества источников возобновляемой генерации в системе распределения привело к увеличению тока питания, что в результате создало новые проблемы для системы электрозащиты. В этой статье выполнено техническое сравнение четырех различных способов для устранения неправильной работы дистанционных реле. Предыдущие способы обеспечения селективности повышения чувствительности дистанционных защит при наличии объектов распределенной генерации были либо дорогими, либо малонадежными. Рассмотренные способы применимы к дистанционным реле как в радиальных распределительных сетях, так и магистральных. Эти способы не требуют для работы каких-либо периферийных устройств или каналов связи и, таким образом, являются более экономичными по сравнению с другими решениями.

Рассмотренные способы повышения селективности и чувствительности действия дистанционной защиты в сетях с распределенной генерацией обладают достоинствами и недостатками. Очевидно, что каждый из них обладает преимуществами в определенных условиях, характеризуемых топологией распределительной сети, типом, параметрами и режимами работы источников питания и нагрузки. Актуальным является исследование влияния параметров и режимов работы объектов распределенной генерации на действие дистанционной защиты. Перспективным направлением является применение средств и методов искусственного интеллекта, например, нейронных сетей, нечеткой логики и т.д. с целью повышения эффективности действия дистанционной защиты в сетях с распределенной генерацией.

ЛИТЕРАТУРА

- Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tcvetkov P. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting // Energies. 2021. Vol. 14 (16). P. 5059. DOI: 10.3390/en14165059.
- Kovalchuk M.S., Baburin S.V. Modelling and control system of multi motor conveyor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327 (2). – P. 022065. – DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022065.
- Pirog S., Shklyarskiy Y., Skamyin A. Non-linear electrical load location identification // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 237. – P. 317–321. – DOI: 10.31897/ PMI.2019.3.317.
- Distortion load identification based on the application of compensating devices / Y. Shklyarskiy, A. Skamyin, I. Vladimirov, F. Gazizov // Energies. – 2020. – Vol. 13 (6). – P. 1430. – DOI: 10.3390/en13061430.
- 5. Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами // Записки Горного института. – 2021. – № 247. – С. 132–140. – DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.
- Gonen T. Electric power distribution engineering. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015. 768 p.
- 7. Hariri F., Crow M. New infeed correction methods for distance protection in distribution systems // Energies. 2021. Vol. 14 (15). P. 4652. DOI: 10.3390/en14154652.
- Adaptive Mho distance protection for interconnected transmission lines compensated with thyristor controlled series capacitor / G.M. Abo-Hamad, D.K. Ibrahim, E. Aboul Zahab, A.F. Zobaa // Energies. – 2021. – Vol. 14 (9). – P. 2477. – DOI: 10.3390/en14092477.
- Brearley B.J., Prabu R.R. A review on issues and approaches for microgrid protection // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 67. – P. 988–997. – DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.047.
- 10. An update on power quality / ed. by D.D-Ch. Lu. Sydney: Intech-Open, 2014. 160 p.

- 11. Wang Y., Orchard J. Fast discrete orthonormal stockwell transform // SIAM. Journal on Scientific Computing. 2009. Vol. 31 (5). P. 4000–4012.
- Krishnanad K.R., Dash P.K. A new real-time discrete S-transform for cross-differential protection of shunt-compensated power systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2013. – Vol. 28 (1). – P. 402–410.
- Nguyen T., Liao Y. Power quality disturbance classification utilizing S-transform and binary feature matrix method // Electrical Power System Research. – 2009. – Vol. 79. – P. 569–575.
- S-Transform based fault detection algorithm for enhancing distance protection performance / J.J. Chavez, M. Popov, D. López, S. Azizi, V. Terzija // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – Vol. 130. – P. 106966. – DOI: 10.1016/ j.ijepes.2021.106966.
- Mishra P., Pradhan A.K., Bajpai P. Adaptive distance relaying for distribution lines connecting inverter-interfaced solar PV plant // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2021. – Vol. 68. – P. 2300–2309.
- Thakre M.P., Kale V.S. An adaptive approach for three zone operation of digital distance relay with Static Var Compensator using PMU // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2016. – Vol. 77. – P. 327–336.
- Tsimtsios A.M., Korres G.N., Nikolaidis V.C. A pilot-based distance protection scheme for meshed distribution systems with distributed generation // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2019. – Vol. 105. – P. 454–469.
- Anderson, P.M. Power System Protection; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 1999; p. 379.
- 19. Kezunovic M., Ren J., Lotfifard S. Design, modeling and evaluation of protective relays for power systems. Berlin; Heidelberg: Springer, 2016. 297 p.
- 20. Horowitz S.H., Phadke A.G. Power system relaying. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014. 111 p.
- Nikolaidis V.C., Tsimtsios A.M., Safigianni A.S. Investigating particularities of infeed and fault resistance effect on distance relays protecting radial distribution feeders with DG // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 11301–11312.
- 22. Impact of inverter based generation on bulk power system dynamics and short-circuit performance: Technical Report PES-TR68 / IEEE Power & Energy Society. – New York, 2018.
- 23. International, M.H. PSCAD Version 5.0. Winnipeg, MB, Canada, 2021. URL: https://www.pscad.com/ (accessed: 30.07.2021).
- 24. **Ibrahim M.A.** Disturbance analysis for power systems. 1st ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. 223 p.
- Maali Amiri E., Vahidi B. Integrated protection scheme for both operation modes of microgrid using S-Transform // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – Vol. 121. – P. 106051.
- Suja S., Jerome J. Pattern recognition of power signal disturbances using S Transform and TT Transform // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2010. – Vol. 32 (1). – P. 37–53.
- 27. IEEE 519–2014: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems / PE/T&D Transmission and Distribution. IEEE, 2014.
- Koteleva N.I., Korolev N.A., Zhukovskiy Y.L. Identification of the technical condition of induction motor groups by the total energy flow // Energies. – 2021. – Vol. 14 (20). – P. 6677. – DOI: 10.3390/en14206677.

STUDY OF THE PROTECTION ALGORITHMS IN DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS

Ustinov D.A., Aysar A.R.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Current trends in the development of power supply systems for industrial facilities when applying the principles of distributed generation consist in the implementation of power supply from several power sources of different types and characteristics (photovoltaic cells, wind power plants, microturbine plants, diesel power plants), the maximum approximation of power sources to electrical loads, the use of electricity storage. The availability of such installations near consumers reduces the quantitative energy consumption by reducing the technical losses of the generated energy and reducing dependence on fossil fuels. However, with these advantages, distributed generation has created technical problems, one of which is the complication of relay protection systems due to the possibility of powering the damage point from different sides. This circumstance requires the development of new algorithms and protection schemes to ensure selectivity and to increase the sensitivity of relay protection. The purpose of the study is to analyze the algorithms of remote protection in distributed generation systems. The methods used comprise an integrated approach, including scientific analysis, processing and analysis of the results of theoretical and experimental studies in the field of relay protection of electrical complexes in networks with distributed generation. The results obtained present the analysis of various algorithms for the implementation of protection, which were implemented as proposals for distribution networks. The system of remote protection in networks containing distributed generation systems is presented, and the algorithms of operation are compared to increase the sensitivity of remote protection devices to the occurrence of various emergency modes: single-phase and three-phase short circuits. Several algorithms for increasing the sensitivity of remote protection for distribution networks in the presence of several power sources are considered. The comparison of these algorithms according to the criteria of the implementation cost, the accuracy of implementation, the number of necessary input data is also carried out. Practical significance of the research the research results can be used to take into account the effect of changes in the parameters of protected connections under conditions of electrical complexes operation in a network with distributed generation on the effectiveness of remote protection. They make it possible to increase the sensitivity and selectivity of the remote protection operation in case of emergency situations.

Keywords: energy, distributed generation (DG), protection schemes, distribution networks, protection algorithms, distance protection.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-41-55

REFERENCES

- Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tcvetkov P. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting. *Energies*, 2021, vol. 14 (16), p. 5059. DOI: 10.3390/ en14165059.
- Kovalchuk M.S., Baburin S.V. Modelling and control system of multi motor conveyor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327 (2), p. 022065. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022065.
- Pirog S., Shklyarskiy Y., Skamyin A. Non-linear electrical load location identification. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 317–321. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.317.
- Shklyarskiy Y., Skamyin A., Vladimirov I., Gazizov F. Distortion load identification based on the application of compensating devices. *Energies*, 2020, vol. 13 (6), p. 1430. DOI: 10.3390/en13061430.
- Sychev Yu.A., Zimin R.Yu. Povyshenie kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya mineral'no-syr'evogo kompleksa gibridnymi fil'trokompensiruyushchimi ustroistvami [Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices]. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*, 2021, no. 247, pp. 132–140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14. (In Russian).
- 6. Gonen T. Electric power distribution engineering. Boca Raton, FL, CRC Press, 2015. 768 p.
- 7. Hariri F., Crow M. New infeed correction methods for distance protection in distribution systems. *Energies*, 2021, vol. 14 (15), p. 4652. DOI: 10.3390/en14154652.
- Abo-Hamad G.M., Ibrahim D.K., Aboul Zahab E., Zobaa A.F. Adaptive Mho distance protection for interconnected transmission lines compensated with thyristor controlled series capacitor. *Energies*, 2021, vol. 14 (9), p. 2477. DOI: 10.3390/en14092477.
- Brearley B.J., Prabu R.R. A review on issues and approaches for microgrid protection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 67, pp. 988–997. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.047.
- 10. Lu D.D.-Ch., ed. An update on power quality. Sydney, Intech-Open, 2014. 160 p.

- 11. Wang Y., Orchard J. Fast discrete orthonormal stockwell transform. *SIAM. Journal on Scientific Computing*, 2009, vol. 31 (5), pp. 4000–4012.
- Krishnanad K.R., Dash P.K. A new real-time discrete S-transform for cross-differential protection of shunt-compensated power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, vol. 28 (1), pp. 402–410.
- 13. Nguyen T., Liao Y. Power quality disturbance classification utilizing S-transform and binary feature matrix method. *Electrical Power System Research*, 2009, vol. 79, pp. 569–575.
- Chavez J.J., Popov M., López D., Azizi S., Terzija V. S-Transform based fault detection algorithm for enhancing distance protection performance. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, vol. 130, p. 106966. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106966.
- Mishra P., Pradhan A.K., Bajpai P. Adaptive distance relaying for distribution lines connecting inverter-interfaced solar PV plant. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, vol. 68, pp. 2300–2309.
- Thakre M.P., Kale V.S. An adaptive approach for three zone operation of digital distance relay with Static Var Compensator using PMU. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, vol. 77, pp. 327–336.
- Tsimtsios A.M., Korres G.N., Nikolaidis V.C. A pilot-based distance protection scheme for meshed distribution systems with distributed generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, vol. 105, pp. 454–469.
- Anderson, P.M. Power System Protection; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 1999; p. 379.
- 19. Kezunovic M., Ren J., Lotfifard S. *Design, modeling and evaluation of protective relays for power systems.* Berlin, Heidelberg, Springer, 2016. 297 p.
- 20. Horowitz S.H., Phadke A.G. *Power system relaying*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2014. 111 p.
- 21. Nikolaidis V.C., Tsimtsios A.M., Safigianni A.S. Investigating particularities of infeed and fault resistance effect on distance relays protecting radial distribution feeders with DG. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 11301–11312.
- 22. Impact of inverter based generation on bulk power system dynamics and short-circuit performance. Technical Report PES-TR68. New York, IEEE Power & Energy Society, 2018.
- 23. International, M.H. PSCAD Version 5.0. Winnipeg, MB, Canada. 2021. Available at: https://www.pscad.com/ (accessed 30.07.2021).
- 24. Ibrahim M.A. *Disturbance analysis for power systems*. 1st ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2011. 223 p.
- 25. Maali Amiri E., Vahidi B. Integrated protection scheme for both operation modes of microgrid using S-Transform. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 121, p. 106051.
- 26. Suja S., Jerome J. Pattern recognition of power signal disturbances using S Transform and TT Transform. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2010, vol. 32 (1), pp. 37–53.
- 27. IEEE 519–2014: *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. PE/T&D Transmission and Distribution. IEEE, 2014.
- Koteleva N.I., Korolev N.A., Zhukovskiy Y.L. Identification of the technical condition of induction motor groups by the total energy flow. *Energies*, 2021, vol. 14 (20), p. 6677. DOI: 10.3390/en14206677.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Устинов Денис Анатольевич – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет. (Адрес: 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2. E-mail: Ustinov_DA@pers.spmi.ru).

Ustinov Denis Anatolevich – Doctor of Sciences (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the of Electricity and Electromechanics Department of Saint Petersburg Mining University. (Address: 2, 21st line, St. Petersburg, 199106, Russia. E-mail: Ustinov_DA@pers.spmi.ru).



Абу Рашид Аисар – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет. (Адрес: 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2. E-mail: Aysarabourashid91@gmail.com).

Abou Rashid Aysar – Postgraduate student of Saint Petersburg Mining University. (Address: 2, 21st line, St. Petersburg, 199106, Russia. E-mail: Aysarabourashid91@gmail.com).

Статья поступила 17 февраля 2023 г. Received February 17, 2023

To Reference:

Ustinov D.A., Aysar A.R. Issledovanie algoritmov raboty distantsionnoi zashchity v sistemakh raspredelennoi generatsii [Study of the protection algorithms in distributed generation systems]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 2 (59), pp. 41–55. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-41-55.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2023

апрель-июнь

№ 2 (59)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.355, 629.34, 656.131

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ СИЛОВОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С УЧЕТОМ НАГРУЗОЧНЫХ ЦИКЛОВ ДВИЖЕНИЯ

Н.И. Щуров, С.А. Внуков

Новосибирский государственный технический университет

Основной проблемой проектирования тягового привода являются нестабильный уровень нагрузок электромобиля, большое количество разгонов и торможений, а также реверсивная работа тягового двигателя. Цель – разработка энергоэффективного привода на основе ездового цикла для электромобиля.

В данной работе был проведен анализ ездового цикла WLTC, рассмотрены его основные характеристики на базе тестовых процедур при различных рабочих условиях. Выбрана мощность тягового электродвигателя (ТЭД) на базе характеристик выбранного транспортного средства (ТС), построены тяговые характеристики при различных параметрах ускорения, выбрана конкретная модель тягового двигателя. Выполнено моделирование тягового привода на основе цикла движения WLTC в программной среде "Matlab Simulink", описаны основные блоки модели, выведены зависимости, подтверждающие адекватность математического моделирования. Выбран подходящий накопитель энергии на основе сравнительной таблицы аккумуляторных батарей.

В конечном счете было выполнено моделирование силовой энергоустановки электромобиля с учетом нагрузочного цикла WLTC, при различных входных параметрах и условиях.

Ключевые слова: силовая энергоустановка, тяговый привод, моделирование, ездовой цикл WLTC, тяговые характеристики, энергия.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-56-67

Введение

Нарастающее производство электромобилей в мировой практике влечет за собой увеличение количества требований к поддержанию уровня экологичности и экономичности при эксплуатации. Основные преимущества использования гибридных транспортных средств: снижение топливных расходов и выбросов вредных веществ в атмосферу. Данные факторы характерны и актуальны для городского электрического транспорта. Основным конструктивным решением данных проблем является разработка энергоэффективного привода [1].

Электропривод транспортного средства является электротехническим устройством, которое включает в себя наличие силовой энергоустановки, способной обеспечить все режимы движения электротранспортного средства. Силовая энергоустановка содержит: тяговый электродвигатель (ТЭД), аккумуляторный блок питания, систему управления батареей, контроллер и датчики, подающие сигналы на двигатель, преобразователь электрической энергии и устройство распределения мощности [2].

В качестве бортового накопительного устройства для электромобиля, как правило, применяются литий-ионные аккумуляторы, однако могут использоваться суперконденсаторы и топливные элементы [3].

Во время процесса зарядки аккумуляторной батареи происходит контроль таких параметров, как напряжение, ток, температура и текущее состояние уровня заряда [4].

© 2023 Щуров Н. И., Внуков С. А.

Анализ циклов движения позволяет оценить процессы деградации накопительного устройства при нормальных условиях эксплуатации. В рамках исследования используются сертифицированные циклы движения с учетом измерения параметров мгновенного тока или скорости для наиболее точного математического описания в результате пересчета. Основными признаками циклов движения являются местоположение и тип транспортного средства [5].

Для дальнейших расчетов в качестве прототипа был выбран ездовой цикл WLTC, который является наиболее приоритетным для описания реальных процессов, протекающих в тяговом приводе транспортного средства. Данный цикл широко описывает нагревательные процессы силовой установки, а также имеет комплексный подход к контролю уровня деградации накопительного элемента. Моделирование силовой энергоустановки отражает действительность при эксплуатации электромобиля [6].

1. Всемирный цикл WTLC

Данный цикл движения WLTC характеризуется проведением различных тестовых испытаний при эксплуатации легковых автомобилей. Существуют альтернативные версии данному циклу: NEDC (Европейский цикл), FTP-75 (Американский цикл) и JC08 (Японский цикл) [7].

Разработка программы проведения испытаний (тестовых циклов движения) для транспортных средств началась в 2007 году. Основными критериями проведения тестовых испытаний являлись: низкий диапазон температур окружающей среды, низкий уровень атмосферного давления, наличие охладительных систем и эксплуатация при нормальных рабочих условиях. В результате были выдвинуты строгие требования по снижению уровня выбросов углекислого газа (СО₂). На рис. 1 представлена диаграмма ездового цикла WLTC.





Ездовой цикл движения WLTC состоит из четырех скоростных режимов: низкий – 56,5 км/ч; средний – 76,6 км/ч; высокий – 97,4 км/ч; очень высокий – 131,6 км/ч. Скоростные режимы «низкий» и «средний» описывают городское движение, а режимы «высокий» и «очень высокий» – движение за городом.

Цикл WLTC характерен для транспортных средств с массой до 3,5 т. Основной характеристикой является энерговооруженность – зависимость мощности тягового электродвигателя от полной массы транспортного средства. Существует классификация в зависимости от значения максимальной скорости.

Подразделение по энерговооруженности осуществляется на три класса: до 22 Вт/кг; в пределах 22...34 Вт/кг; больше 34 Вт/кг. Это связано с отличительными особенностями автомобильного производства для каждой страны. Например, автомобильное производство Индии характеризуется относительно низкой стоимостью и низкой энергоэффективностью. У каждого класса энерговооруженности есть свой параметр максимального ускорения: $a_{\rm max} = 0,76 \text{ м/c}^2$ (меньше, чем показатель цикла NEDC – 0,833 м/c²); $a_{\rm max} = 0,96 \text{ м/c}^2$; $a_{\rm max} = 1,58 \text{ м/c}^2$ (больше, чем показатель цикла ARDC – 1,47 м/c²).

Для проведения дальнейших расчетов в качестве базового варианта был взят класс № 3, характеризующийся максимальной скоростью – $V_{\text{max}} = 120$ км/ч. К данному классу энерговооруженности относятся такие автомобили, как Chevrolet Niva (41 BT/кг), Renault Kangoo (46 BT/кг), Daewoo Matiz (49 BT/кг) и Nissan March (52 BT/кг). При дальнейшем исследовании мы будем использовать цикл движения только для данного класса.

2. Определение мощности электродвигателя и выбор конкретной модели

В качестве расчетного транспортного средства принят автомобиль Nissan March. Параметры выбранного TC представлены в табл. 1.

Табл. 1 / Table 1

Характеристики ТС

Characteristics of the vehicle

Тип ТС	Полная масса, кг	Вместимость, чел.	Диаметр колеса, мм
Автомобиль Nissan March	1240	5	530

Мощность электродвигателя (ТЭД) определяется по формуле [8]

$$P = FV, \tag{1}$$

где F – тяговое усилие, кГс \rightarrow H; V – скорость TC, км/ч.

Ускорение ТС определяется по формуле [9]

$$a = \frac{Fz - \omega_0 m}{102(1+\gamma)m},\tag{2}$$

где z = 1 – количество электродвигателей (ТЭД); $\omega_0 = 12 + 0,0018V^2$ – удельное основное сопротивление движению для электромобиля, Н/кН; m = 1240 – масса ТС, кг; $\gamma = 0,15$ – коэффициент инерции вращающихся частей.

На основе аналитических расчетов были построены зависимости P(V) при параметрах ускорения 2, 2,5 и 3 м/с² (hbc/ 2). Результаты тяговых расчетов сведены в табл. 2.

Если принимать во внимание максимальное пусковое ускорение 3 м/ c^2 , необходимая максимальная мощность при условии выхода на автоматическую характеристику в 60 км/ч составит 73 кВт.

Выбираем синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) ОРИОН-18-2-04. Технические характеристики двигателя представлены в табл. 3.



Puc. 2 – Зависимость P(V) при различных значениях ускорения *Fig.* 2 – Dependence P(V) for various values of acceleration

Табл. 2 / Table 2

V m du	o. II/II	<i>F</i> , кI				<i>Р</i> , кВт		
<i>V</i> , KM/4	ω0, п/кп	$a = 2 \text{ M/c}^2$	$a = 2,5 \text{ M/c}^2$	$a = 3 \text{ M/c}^2$	$a = 2 \text{ M/c}^2$	$a = 2,5 \text{ M/c}^2$	$a = 3 \text{ M/c}^2$	
0	12	298	369	440	0	0	0	
5	12,045	298	369	440	4,057	5,02	5,984	
10	12,18	299	370	440	8,119	10,05	11,97	
15	12,405	299	370	441	12,19	15,08	17,97	
20	12,72	299	370	441	16,27	20,13	23,98	
25	13,125	300	371	442	20,38	25,19	30,01	
30	13,62	300	371	442	24,5	30,28	36,06	
35	14,205	301	372	443	28,65	35,4	42,14	
40	14,88	302	373	444	32,84	40,55	48,25	
45	15,645	303	374	445	37,06	45,73	54,4	
50	16,5	304	375	446	41,32	50,96	60,59	
55	17,445	305	376	447	45,63	56,23	66,82	
60	18,48	306	377	448	49,99	61,55	73,11	
65	19,605	308	379	450	54,4	66,92	79,45	
70	20,82	309	380	451	58,87	72,36	85,85	

Результаты расчета зависимостей P(V)Results of P(V) dependences calculation

Табл. 3 / Table 3

Технические характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами Specifications of the permanent magnet synchronous motor

Технические характеристики "ОРИОН-18-2-04"	Ед. изм.	Значение
Пиковый (пусковой) момент (23 с) <i>М</i> _u ,	Н∙м	1352
Номинальный момент (вод., возд. охл.) М _с	Н∙м	338
Номинальная мощность (вод., возд. охл.) <i>Р</i> _с	кВт	67,5
Номинальное напряжение U _{ном}	В	500
КПД (при номинальной мощности) E _{ff}	%	97,6
Диаметр ротора D _r	MM	240

Технические характеристики "ОРИОН-18-2-04"	Ед. изм.	Значение
Диаметр статора <i>D</i> _s	MM	356
Длина активной стали <i>В</i> _m	MM	120
Длина статора с обмоткой Ls	MM	210
Тепловая мощность (пиковая) P_{Ut}	кВт	3896
Тепловая мощность (номинальная, вод. охл.) P _{Ct}	Вт	974
Константа момента (20 °C) <i>К</i> _Т	Н∙м/А	1,45
Константа двигателя (20 °C) K _m	$H \cdot m\sqrt{\mathrm{Bt}}$	10,83
Масса электромагнитной системы <i>m</i> _{em}	КГ	63,0
Масса двигателя (корпусное исполнение) т	КГ	105

Окончание табл., 3 / The End Table 3

3. Моделирование тягового привода на основе цикла движения WLTC

Для расчета и построения кривых движения в качестве исходных данных выбран перегон, имеющий нулевой уклон на протяжении всей длины и не имеющий кривых участков [10].

Для снижения трудоемкости вычислений была создана имитационная математическая модель, позволяющая определить энергетику движения TC. В качестве блока управления был смоделирован цикл движения WLTC. Общий вид модели с пояснениями представлен на рис. 3 [11].



Рис. 3 – Общий вид имитационной математической модели на основе цикла движения WLTC

Fig. 3 – General view of the simulation mathematical model based on the WLTC motion cycle

Вычисление ускорения TC а массой m основано на втором законе Ньютона $F_{\rm pe3} = (1+\gamma)ma$, при этом в зависимости от режима движения $F_{\rm pe3}$ принимает значения:

- $F_{\text{тяг}} W_0$ в режиме тяги;
- - W₀ в режиме выбега;
- $-(B_{\text{торм}} + W_0)$ в режиме торможения,

где $F_{\text{тяг}}$ и $B_{\text{торм}}$ – силы тяги и торможения, развиваемые в ТЭД; W_0 – основное сопротивление движению.

Задание сил тяги и торможения в блоках показано в табл. 4 и 5.

Таблица 4 / Table 4

Результаты расчета силы тяги Results of the calculation of the traction force

Наименование параметра					3	начени	e				
<i>V</i> , км/ч	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
$F_{$ тяг, Н	286	267	250	235	222	210	200	190	182	174	167

Таблица 5 / Table 5

Результаты расчета силы торможения

Results of the calculation of the braking force

Наименование параметра				Значение			
<i>V</i> , км/ч	90	95	100	105	110	115	120
$F_{\text{торм}}, H$	200	189	180	171	164	156	150

Вычисление силы удельного основного сопротивления движению показано на рис. 4.



Puc. 4 – Задание характеристик тяги и торможения *Fig.* 4 – Setting the characteristics of traction and braking

Перевод единиц измерения для сил свернут в блок, представленный на рис. 5.



Рис. 5 – Перевод единиц измерения

Fig. 5 - Conversion of measurement units

С помощью данных блоков моделирования происходит вычисление ускорения по формуле $a = F_{pe3} / (1+\gamma)m$.

Переключение режимов тяги и торможения происходит с помощью последовательности 1 и -1 из блока "upravlenie". В его основе лежит математическое описание цикла движения WLTC, заданное в четырех скоростных этапах. Его содержимое представлено в табл. 6.

Таблица 6 / Table 6

Переключение режимов тяги и торможения

Switching traction and braking modes

Скоростные этапы	Последовательность
0	1
18	1
28	-1
40	-1

В данной имитационной математической модели введены блоки (рис. 4) для проведения энергетических расчетов.

Адекватность модели подтверждает полученный график ускорения (рис. 6), согласно которому величина ускорения соответствует расчетному.







4. Выбор накопителя энергии

Расчет энергии накопителя с помощью параметров, полученных в результате моделирования, выглядит следующим образом.

Для обеспечения запаса хода в 200 км потребуется накопитель энергии объемом в (200/0,819)0,34 = 83 кВт · ч, где L = 200 км – запас хода TC, S = 0,819 км – расстояние, пройденное TC, E = 0,34 кВт · ч – энергия TC.

На основе сравнительной табл. 7 различных типов наиболее используемых аккумуляторных батарей наибольшую удельную плотность энергии имеют литийионные аккумуляторы на основе кобальта лития (150...190 Вт · ч/кг), однако пиковый ток нагрузки составляет всего 3С в отличие от 5С у литий-феррофосфатных (LiFePO₄) аккумуляторов. Еще одним плюсом литий-феррофосфатных аккумуляторов является в 2 раза больший жизненный цикл. Поэтому выбранный тип тяговой аккумуляторной батареи – LiFePO₄.

Таблица 7 / Table 7

	SI A	Никол	Никель-	Литий-ионные			
Характеристика	(PbSO ₄)	кадмиевые	металлогид- ридные	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄	
1. Удельная плот-							
ность энергии,	0,030,05	0,0450,08	0,060,12	0,150,19	0,10,135	0,090,12	
Вт·ч/кг [×10 ³]							
2. Время быстрой	8 16 u	Ofrancia 1 m	2 4	2 4 11	1 ч или	1 ч или	
зарядки	0104	Обычно Г ч	24 4	24 4	менее	менее	
3. Жизненный цикл	0.2 0.3	1.0	0.2 0.5	05 10	05 10	10 20	
(80 % разряда) [×10 ³]	0,20,3	1,0	0,50,5	0,51,0	0,51,0	1,02,0	
4. Напряжение в эле-	2 P	1 2 P	1 2 P	26 P	2 8 D	2 2 P	
менте (номинальное)	2 B	1,2 D	1,2 D	3,0 B	5,6 Б	5,5 Б	
5. Пиковый ток на-				> 2C	> 200	> 200	
грузки (лучшие ре-	5C (0,2C)	20C (1C)	5C (0,5C)	-30	(< 10C)	> 30C (< 10C)	
зультаты)				(<10)	(<100)	(<100)	

Технические параметры аккумуляторов

Technical parameters of batteries

При напряжении аккумуляторной батареи в 500 В, равном напряжению питания ТЭД, необходимая емкость накопителя составит 83 000/500 = 166 А · ч [12].

Обеспечить подобную емкость может сборка аккумуляторной батареи на базе стандартных ячеек формата 18650. Технические характеристики Li-ion ячейки 18650 Li-ion 2600 mAh представлены в табл. 8.

Таблица 8 / Table 8

Ячейка Li-ion 18650 2600 mAh

Cell Li-ion 18650 2600 mAh

Параметр	Значение		
Номинальное напряжение	3,2 B		
Плотность энергии	195 Вт · ч/кг		
Максимальный ток разряда	7,5 A		
Максимальный ток заряда	1,25 A		
Внутреннее сопротивление	≤30 mΩ		
Срок жизни	600 циклов/емкость 80 %		

Для обеспечения напряжения в 500 В потребуется сборка из 500/3,2 = 156 ячеек 18650. При этом общая масса будет составлять 318 кг.

Выбор нужной BMS определяется двумя параметрами: 1) схемное решение (конструктивное исполнение); 2) уровень нагрузки (мощности). Классификация BMS: 1) общий порт подключения (циклы заряд/разряд); 2) раздельный порт подключения (разные разъемы).

Выводы

В данном исследовании были выполнены следующие этапы:

– проведен анализ всемирного цикла WLTC, описаны общие показатели классов энерговооруженности. В качестве расчетного был принят класс № 3, имеющий энерговооруженность больше 34 Вт/кг, максимальное ускорение 1,58 м/с², максимальную скорость 120 км/ч; – выполнен расчет мощности двигателя (67,5 кВт), построена зависимость мощности от скорости P(V), выбрана конкретная модель двигателя (СДПМ) "ОРИОН-18-2-04";

– смоделирован тяговый привод на основе всемирного цикла WLTC, составлена имитационная модель в программной среде "Matlab Simulink", представлено математическое описание энергетических блоков модели, получены зависимости ускорения и энергии от времени, зависимость скорости от пути. Для достижения максимальной скорости 120 км/ч, выбега (20%) и остановки потребуется 1,225 МДж (или 0,34 кВт · ч) энергии. При этом транспортное средство пройдет расстояние 819 м;

– выбран накопитель энергии, для обеспечения запаса хода в 200 км потребуется накопитель энергии объемом в 83 кВт·ч. Необходимая емкость накопителя составила 166 А · ч. В качестве прототипа была принята сборка аккумуляторной батареи на основе ячеек 18650.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Штанг А.А., Ярославцев М.В. Контактно-аккумуляторный манёвровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 1. С. 13–16.
- Штанг А.А., Ярославцев М.В. Определение основных характеристик комбинированной энергетической установки для городского безрельсового транспорта // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2016. № 4 (33). С. 111–120. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-111-120.
- 3. Щуров Н.И., Мятеж С.В., Малозёмов Б.В. Анализ и расчет неактивной мощности в сети питания электропотребителей рудничного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 270–283.
- Щуров Н.И. Энергоэффективная силовая установка для автономных транспортных средств // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды Седьмой Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 23–24 ноября 2016 г. – Новокузнецк, 2016. – С. 107–108.
- 5. Малозёмов Б.В., Мятеж С.В., Щуров Н.И. Повышение количества рабочих зон в трехфазном выпрямителе переменного тока // Электротехника. – 2021. – № 6. – С. 56–60.
- Малозёмов Б.В., Трухин Ф.В. Повышение эффективности и надежности тягового двигателя троллейбуса // Интеллектуальный потенциал Сибири: 26-я Региональная научная студенческая конференция, Новосибирск, 22–24 мая 2018 г.: в 2 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 650–652.
- Дедов С.И., Бороненко А.О., Штанг А.А. Определение параметров последовательной гибридной установки на основе ездовых циклов // Интеллектуальный потенциал Сибири: 26-я Региональная научная студенческая конференция, Новосибирск, 22–24 мая 2018 г.: в 2 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 587–588.
- Дедов С.И. Анализ современных ездовых циклов и их актуальность при определении параметров гибридной энергетической установки // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г.: в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 5. – С. 191–194.
- 9. Бирюков В.В., Панченко Ю.В. Повышение надёжности транспортного обслуживания городов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 3–4. С. 34–36.
- 10. Бирюков В.В., Бахолдин Д.А. Электробус для внутригородских перевозок пассажиров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 3–4. С. 196–198.
- Внуков С.А. Сравнительный анализ накопителей энергии для гибридного транспорта // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов 16 Всероссийской научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г.: в 11 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – Ч. 5. – С. 135–137.

 Внуков С.А. Электрические тяговые двигатели // Научный форум: тенденции развития науки и общества: сборник материалов Международной научно-практической конференции, 29 окт. 2021 г. – Кемерово, 2021. – С. 44–46.

SIMULATION OF EFFECTIVE ELECTRIC VEHICLE POWER PLANT TAKING INTO ACCOUNT LOAD CYCLES OF MOTION

Shchurov N. I., Vnukov S. A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The main problems of this study include an unstable load level, a large number of accelerations and decelerations, as well as a reverse operation of the traction motor. The goal is to develop an energy efficient drive based on the driving cycle to solve the above problems.

In this work, an analysis of the WLTC driving cycle was carried out and its main characteristics were studied on the basis of test procedures under various operating conditions. The electric motor (EM) power is calculated based on the characteristics of the selected vehicle. Traction characteristics are built for various acceleration parameters and a specific engine model is selected. The traction drive was simulated based on the WLTC motion cycle in the "Matlab Simulink" software environment. The main model blocks are described and dependencies confirming the adequacy of mathematical modeling are displayed on oscilloscopes. A suitable energy storage device has been selected based on the battery comparison table.

Ultimately, the power plant of an electric car was simulated taking into account the WLTC load cycle, under various input parameters and conditions.

Keywords: electric power plant, traction drive, modeling, WLTC driving cycle, traction characteristics, energy

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-56-67

REFERENCES

- Shtang A.A., Yaroslavtsev M.V. Kontaktno-akkumulyatornyi manevrovyi elektrovoz s nakopitelem energii na osnove litii-ionnykh akkumulyatorov [Battery-electric shunting locomotive with lithium-ion storage batteries]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta = Electronics* and electrical equipment of transport, 2016, no. 1, pp. 13–16.
- Shtang A.A., Yaroslavtsev M.V. Opredelenie osnovnykh kharakteristik kombinirovannoi energeticheskoi ustanovki dlya gorodskogo bezrel'sovogo transporta [Evaluation of main parameters of road city transit vehicle hybrid powertrain]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 4 (33), pp. 111–120. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-111-120.
- Shchurov N.I., Myatezh S.V., Malozyomov B.V. Analiz i raschet neaktivnoi moshchnosti v seti pitaniya elektropotrebitelei rudnichnogo transporta [Analysis and calculation of inactive power in the power network of electric consumers of mining transport]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*, 2022, no. 12-2, pp. 270–283.
- Shchurov N.I. [Energy efficient power plant for autonomous vehicles]. Avtomatizirovannyi elektroprivod i promyshlennaya elektronika [Automated electric drive and industrial electronics]. Proceedings of the Seventh All-Russian Scientific and Practical Conference. Novokuznetsk, 2016, pp. 107–108. (In Russian).
- 5. Malozyomov B.V., Myatezh S.V., Shchurov N.I. Povyshenie kolichestva rabochikh zon v trekhfaznom vypryamitele peremennogo toka [Increasing the number of working zones in a three-phase AC rectifier]. *Elektrotekhnika = Russian Electrical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 56–60. (In Russian).
- Malozyomov B.V., Trukhin F.V. [Increasing the efficiency and reliability of the trolleybus traction engine]. *Intellektual'nyi potentsial Sibiri* [Intellectual potential of Siberia]. 26th Regional Scientific Student Conference, Novosibirsk, May 22–24 2018. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018, pt. 2, pp. 650–652. (In Russian).

- Dedov S.I., Boronenko A.O., Shtang A.A. [Determining the parameters of a sequential hybrid installation based on driving cycles]. *Intellektual'nyi potentsial Sibiri* [Intellectual potential of Siberia]. 26th Regional Scientific Student Conference, Novosibirsk, May 22–24 2018. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018, pt. 2, pp. 587–588. (In Russian).
- Dedov S.I. [Analysis of modern driving cycles and their relevance in determining the parameters of a hybrid power plant]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovation]. Collection of scientific papers, Novosibirsk, December 4–8, 2017. Novosibirsk, NSTU Publ., 2017, pt. 5, pp. 191–194. (In Russian).
- Biryukov V.V., Panchenko Yu.V. Povyshenie nadezhnosti transportnogo obsluzhivaniya gorodov [Improving the reliability of transport services for cities]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka = Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East, 2017, no. 3–4, pp. 34–36.
- Biryukov V.V., Bakholdin D.A. Elektrobus dlya vnutrigorodskikh perevozok passazhirov [Electrobus for intra-city passenger transportation]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka = Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2017, no. 3–4, pp. 196–198.
- Vnukov S.A. [Comparative analysis of energy storage devices for hybrid transport]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovation]. Collection of scientific papers of the 16th All-Russian scientific conference of young scientists, Novosibirsk, December 5–8, 2022. Novosibirsk, NSTU Publ. 2022, pt. 5, pp. 135–137. (In Russian).
- Vnukov S.A. [Electric traction engines]. Nauchnyi forum: tendentsii razvitiya nauki i obshchestva [Scientific forum: trends in the development of science and society]. Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference, October 29, 2021. Kemerovo, 2021, pp. 44–46. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Щуров Николай Иванович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: энергосбережение на электрическом транспорте. Опубликовано 147 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20. E-mail: nischurov@mail.ru).

Schurov Nikolay Ivanovich (b. 1947) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Complexes of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy saving in electric transport. He is author of 147 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nischurov@mail.ru).



Внуков Сергей Александрович – родился в 1998 году, ассистент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовая гибридная энергоустановка для электробуса. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20. E-mail abakan.1998@mail.ru).

Vnukov Sergey Alexandrovich (b. 1998) – Assistant of the Department of Electrical Complexes of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on hybrid power plant for electric bus. He is author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail abakan.1998@mail.ru).

Статья поступила 25 мая 2023 г. Received May 25, 2023

To Reference:

Shchurov N.I., Vnukov S.A. Modelirovanie effektivnoi silovoi energoustanovki elektromobilya s uchetom nagruzochnykh tsiklov dvizheniya [Simulation of effective electric vehicle power plant taking into account load cycles of motion]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 2 (59), pp. 56–67. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-56–67.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Выпуск 2 (59) апрель-июнь 2023

Выпускающий редактор И.П. Брованова Корректор И.Е. Семенова Компьютерная верстка Н.В. Гаврилова

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 26.06.2023. Выход в свет 28.06.2023. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16 Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 5,95. Печ. л. 4,25. Изд. № 140. Заказ № 191. Цена свободная

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

16+

Индекс журнала в Роспечати 82961