

ISSN 2074-272X

науково-практичний  
журнал

2013/4

# ЕІЕлектротехніка і ЕІЕлектромеханіка

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Техніка сильних електричних та магнітних полів

70-річчю заводу "Южкабель" присвячується



# НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ «ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

## ДЕРЖВИДАННЯ

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики,  
телебачення та радіомовлення України КВ № 6115 від 30.04.2002 р.  
Видання засновано у 2002 р. Національним технічним університетом  
«Харківський політехнічний інститут»

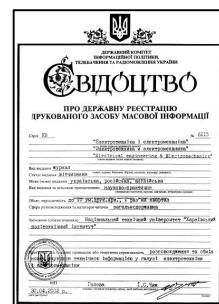
## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

### Головний редактор

Клименко Б.В. д.т.н., професор, НТУ «ХПІ», Харків

### Члени редколегії

Баранов М.І.	д.т.н., начальник відділу НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», Харків
Батигін Ю.В.	д.т.н., професор, завідувач кафедри фізики, ХНАДУ, Харків
Боєв В.М.	д.т.н., професор кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ», Харків
Болюх В.Ф.	д.т.н., професор кафедри загальної електротехніки НТУ «ХПІ», Харків
Буткевич О.Ф.	д.т.н., професор, головний науковий співробітник ІЕД НАНУ, Київ
Гончаров Ю.П.	д.т.н., професор кафедри промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХПІ», Харків
Гурін А.Г.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електроізоляційної і кабельної техніки НТУ «ХПІ», Харків
Данько В.Г.	д.т.н., професор, завідувач кафедри загальної електротехніки НТУ «ХПІ», Харків (голова редакційної ради)
Жемеров Г.Г.	д.т.н., професор кафедри промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХПІ», Харків
Загірняк М.В.	д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, ректор КрНУ, Кременчук
Кириленко О.В.	д.т.н., професор, академік НАНУ, директор ІЕД НАНУ, Київ
Кравченко В.І.	д.т.н., професор, директор НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», Харків
Маслієв В.Г.	д.т.н., професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ», Харків
Михайлов В.М.	д.т.н., професор кафедри інженерної електрофізики НТУ «ХПІ», Харків
Міліх В.І.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних машин НТУ «ХПІ», Харків
Намітоков К.К.	д.т.н., професор кафедри світлотехніки і джерел світла ХНАМГ, Харків
Омельяненко В.І.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ», Харків
Розов В.Ю.	д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, директор НТЦ МТО НАНУ, Харків
Подольцев О.Д.	д.т.н., головний науковий співробітник ІЕД НАНУ, Київ
Пуйло Г.В.	д.т.н., професор кафедри електричних машин ОНТУ, Одеса
Резцов В.Ф.	д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, заступник директора ІВЕ НАНУ, Київ
Рудаков В.В.	д.т.н., професор, завідувач кафедри інженерної електрофізики НТУ «ХПІ», Харків
Сокол Є.І.	д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ проректор НТУ «ХПІ», Харків
Сосков А.Г.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електротехніки ХНАМГ, Харків
Ткачук В.І.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних машин і апаратів НУ «Львівська політехніка», Львів
Шинкаренко В.Ф.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електромеханіки НТУУ «КПІ», Київ
Юферов В.Б.	д.т.н., начальник відділу ННЦ ХФТІ, Харків



## АДРЕСА РЕДАКЦІЇ

Кафедра «Електричні апарати», НТУ «ХПІ», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна.  
тел.: +38 057 707 62 81. e-mail: a.m.grechko@mail.ru

ISSN 2074-272X

© Національний технічний університет «ХПІ», 2013

Підписано до друку 24.07.2013 р.

Формат 60 x 90 1/8. Офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 0457/0357. Ціна договірна.

Дизайн та оформлення обкладинки ФОП Тимченко А.М. 61124, Україна, м. Харків-124, а/с 2249

Надруковано ТОВ «Друкарня "Мадрид"», м. Харків, вул. Ольмінського, 8



## **ЗМІСТ**

### **Електротехніка. Визначні події. Славетні імена**

<b>Золотарев В.М.</b>	Заводу "ЮЖКАБЕЛЬ" – семьдесят лет	<b>4</b>
<b>Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антонец Ю.А., Науменко А.А.</b>	Исследования и разработки ПАО "Завод ЮЖКАБЕЛЬ" по созданию отечественных образцов кабелей и проводов, соответствующих требованиям мировых стандартов	<b>10</b>
<b>Баранов М.И.</b>	Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 15: Изобретение транспорта	<b>15</b>

### **Техніка сильних електрических та магнітних полів**

<b>Безпрозванных Г.В., Бойко А.М.</b>	Електростатичні процеси в силових кабелях	<b>27</b>
<b>Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С.</b>	Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией	<b>32</b>
<b>Голик О.В.</b>	Проблеми застосування економічних критеріїв при розрахунку і конструкуванні високовольтних силових кабелів із пластмасовою ізоляцією	<b>37</b>
<b>Гонтарь Ю.Г., Лавинский Д.В.</b>	Влияние напряженности электрического поля на разрушение поверхностного слоя изоляционной конструкции	<b>40</b>
<b>Гурин А.Г., Антонец С.Ю.</b>	Экспериментальное исследование электрической прочности провода ПЭЭДХ-0,63	<b>44</b>
<b>Гурин А.Г., Корнилов Е.А., Ложки Р.С.</b>	Перспективы применения сильноточных электронных пучков для радиационной сшивки полиэтилена	<b>47</b>
<b>Золотарьов В.М., Антонец Т.Ю.</b>	Динаміка нагрівання високовольтних силових кабелів із пластмасовою ізоляцією	<b>52</b>
<b>Золотарев В.М., Чулеева Е.В., Чулеев В.Л.</b>	Регулирование свойств композиций на основе поливинилхлорида с использованием стабилизаторов, не содержащих свинец, для изоляции кабельной продукции	<b>54</b>
<b>Карпушенко В.П., Золотарев В.В., Чопов Е.Ю., Бузько С.В.</b>	Электрическая система испытаний силовых кабелей всех классов напряжений с изоляцией из сшитого полиэтилена	<b>60</b>

<b>Костюков И.А.</b>	Общие вопросы обеспечения электромагнитной совместимости силовых кабельных линий, их пропускная способность и способы конструктивного исполнения экранов	<b>65</b>
<b>Шумилов Ю.Н.</b>	Особенности выбора наибольшего рабочего напряжения ограничителей перенапряжений для защиты изоляции электрооборудования в сетях 6-35 КВ	<b>69</b>
<b>Щебениук Л.А.</b>	Перевантажувальна спроможність силових кабелів в реальних системах електропостачання	<b>72</b>

### **ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!**

*Науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» – передплатне видання. Звертаємо вашу увагу, що починаючи з 2006 року журнал виходить шість разів на рік. Вартість передплати на рік – 136,44 грн., на два місяці – 22,74 грн., на чотири місяці – 45,48 грн., на шість місяців – 68,22 грн., на вісім місяців – 90,96 грн., на десять місяців – 113,7 грн. Передплатний індекс: 01216.*

### **ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!**

*Постановою президії ВАК України від 15 січня 2003 р. № 1-08/5 науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук та перерегистровано постановою президії ВАК України від 10 лютого 2010 р. № 1-05/1. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.*

*Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу «Електротехніка і Електромеханіка» та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (ВІНІТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВІНІТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВІНІТИ. Згідно з цим договором ВІНІТИ надає редакції журналу звіт про відображення статей з журналу у РЖ та БД ВІНІТИ.*

*Починаючи з №1 за 2006 р. згідно з Наказом МОН України №688 від 01.12.2005 р. журнал надсилається до УкрІНТЕІ.*

*Електронна копія журналу «Електротехніка і Електромеханіка», який зареєстровано у Міжнародній системі реєстрації серійних (періодичних) видань під стандартизованим кодом ISSN 2074-272X, надсилається до Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського. Електронна версія журналу представлена на сайті <http://nbuv.ton.gov.ua> в розділі «Інформаційні ресурси / Наукова періодика України» починаючи з 2005 року, а також на сайті <http://eie.khpi.edu.ua>.*

*У квітні 2013 р. журнал «Електротехніка і Електромеханіка» включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA), а також індексується європейською системою пошуку наукової інформації DRIVER ([www.driver-repository.eu](http://www.driver-repository.eu)), в системі BASE ([www.base-search.net](http://www.base-search.net)), російським індексом наукового цитування (РИНЦ) та Index Copernicus.*

*Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів відповідно до Вимог, які наведені на офіційному сайті НТУ «ХПІ» (<http://www.kpi.kharkiv.edu/eie/>). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу.*

## **ЗАВОДУ "ЮЖКАБЕЛЬ" – СЕМЬДЕСЯТ ЛЕТ**

*Висвітлена історія та досягнення підприємства за його сімдесятиліття. Представлена концепція розвитку вітчизняного кабельного підприємства в ринкових умовах.*

*Освещена история и достижения предприятия за семьдесят лет его существования. Представлена концепция развития отечественного кабельного предприятия в рыночных условиях.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Сегодня публичное акционерное общество "Завод Южкабель" – современное высокотехнологичное предприятие отечественной кабельной индустрии. Его продукция хорошо известна не только в Украине, но и далеко за ее пределами.

А история завода уходит корнями в то далекое время, когда в конце 30-х на окраине города было заложено предприятие радиотехнической промышленности под номером 332 – филиала Харьковского электромеханического завода.

Но мирным планам не суждено было сбыться. Вероломное нападение гитлеровской Германии на Советский Союз внесло свои суровые корректизы в планы тех лет – в немыслимо короткие сроки, в условиях жестоких поражений и потерь начального периода войны, экономику нужно было полностью перестроить на военный лад. Наиболее развитые в промышленном отношении районы были оккупированы, а враг рвался дальше, в глубь страны. В трудных условиях Урала и Сибири, в невероятном напряжении, работали тысячи эвакуированных предприятий. Там в глубоком тылу, где заменяя ушедших на фронт в холодных цехах к станкам становились женщины и подростки, – там ковалось оружие победы. Ценой нечеловеческого напряжения в тылу и неисчислимых жертв на фронтах войны – под Москвой, Сталинградом, на Курской дуге врагу были нанесены сокрушительные поражения, переломившие весь ход Второй мировой войны. Но для окончательной победы над врагом необходимо было еще очень много. В массовых количествах фронту требовалось все более и более совершенная боевая техника и вооружение. Для обеспечения разворачивающихся на огромных театрах военных действий наступательных кампаний, советским войскам как воздух нужны были надежные средства связи, выпуск которых немыслим без применения таких базовых компонент как электрические провода и кабели. Эвакуированные кабельные заводы не справлялись с обеспечением всевозрастающих потребностей базовых отраслей военной промышленности и армии в кабельно-проводниковой продукции.

И тогда приказом № МК-298 Народного Комиссара электротехнической промышленности СССР от 7 октября 1943 года, в целях обеспечения южных фронтов наступающих советских войск и для нужд восстанавливаемых и вновь строящихся промышленных предприятий, в только что освобожденном Харькове предусматривается создание предприятия № 804 по изготовлению кабельно-проводниковой продукции.



Для организации дела на месте, Всесоюзным управлением "Главкабель", из числа опытнейших руководителей и ведущих специалистов-кабельщиков были подобраны и назначены директор завода Ю.А. Зыбин, главный инженер – В.И. Юзефов и два опытных инженера – Н.В. Кудрявцев и Н.Н. Гарниер.

Вскоре группа отбыла в Харьков. А здесь ей представила безрадостная картина: площадка для строительства представляла собой находящиеся в 12 км от центра города 12 гектаров изрезанной оврагами земли. Ни дорог, ни линии электропередачи, не говоря уже о железнодорожном пути, – ничего такого не было даже поблизости. Из немногих довоенных помещений для нужд производства с трудом можно было приспособить только одно, да и оно было в плачевном состоянии. Все разграблено, разбито... С чего начать и за что браться? Куда ни кинь – всюду клин...

Начинали с чего могли: собирали людей – тех, кто уцелел, "транспорт" – пару лошадей и трофеиную повозку, инструмент – гаечные ключи, молотки и лопаты, оборудование – разукомплектованное, ржавые и разбитые нехитрые машины завода "Укркабель", которые пытались эвакуировать, но которые так и пролежали здесь в Харькове на электромеханическом заводе всю войну – вот, пожалуй, и вся "производственная база", с которой все начиналось.

Но энтузиазм людей, их воля, трудолюбие и преданность делу взяли верх над безысходностью. Ровно через месяц после того приказа, на заводе загорелась первая электрическая лампочка, а 7 марта 1944 года он дал свою первую опытную продукцию – несколько десятков килограммов обмоточных и эмалированных проводов, проводов изготовленных в полукустарных условиях, зачастую еще с отклонениями от норм, но проводов так необходимых фронту. Эта первая трудовая победа сплотила и вдохновила первопроходцев – их усилиями уже к лету 1944 года была выпущена и отгружена потребителю первая промышленная партия обмоточных и эмалированных проводов.

Далеко не сразу и не все шло гладко. Страшно сказывалась общая отсталость. Применявшийся гужевой транспорт не справлялся с возросшими перевозками. Для обеспечения сколько-нибудь серьезного грузового оборота нужна была железнодорожная ветка. Нужна позарез, а помочи ждать неоткуда – страна еще воевала и война поглощала все ресурсы. И тогда, на производственном совещании, проведенном под открытым небом, было решено – каждый работник предприятия должен проложить лично 6 метров железнодорожного пути.

© В.М. Золотарев

Это было трудное решение, но на его тяжесть никто не жаловался – люди понимали все. И делали все, что могли. А к середине 1944 г. на завод пришел первый поезд. Так в то далекое время подымался завод, очень тяжело и очень непросто – все давалось крайним напряжением сил. Но усилия поначалу совсем маленько коллектива, его упорный повседневный труд приносили свои плоды.

К началу 45-го в основном было завершено техническое проектирование, а 23 апреля этого года предприятие № 332, из филиала Харьковского электромеханического завода, было преобразовано в самостоятельное предприятие союзного значения – кабельный завод № 804 Министерства электротехнической промышленности СССР.

С приобретением нового статуса начали лучше решаться и вопросы технического перевооружения. Но машин не хватало и поначалу обходились теми, которые доставались по reparациям – летом того же года из Будапешта на завод поступило семь эшелонов оборудования фирмы "Сименс" и на его базе было развернуто производство силовых кабелей с бумажно-масляной изоляцией. К началу 1946 года завод уже имел 286 единиц различного оборудования. Кроме трех основных построенных цехов, уже собственными силами ввели в эксплуатацию участок для варки лака, фильерную мастерскую, цех товаров народного потребления. Как ни сложно было – создали испытательную лабораторию для входного контроля сырья и контроля готовой продукции. К концу 40-х практически был построен корпус № 1, где разместили волочильный цех и отделение скрутки. В 1951 году, после специального решения Совета Министров СССР, строительство набрало ускорение – были сооружены корпус № 2 – цеха обмоточных проводов и корпус № 4 – цеха силовых кабелей.

Видно так устроена жизнь – в ней судьбы предприятий в чем-то похожи на судьбы людей. Характер человека формирует его окружение. Лицо предприятия тоже во многом определяется той ролью, которую оно играет в сложном и многообразном механизме хозяйственных связей. С самого начала на завод "Южкабель" были возложены задачи освоения и производства компонент для таких базовых отраслей, как тяжелое электромашиностроение, электроаппаратостроение, железнодорожный транспорт, энергетика, связь, горнодобывающая промышленность. В первое послевоенное время, когда нужно было не только восстанавливать разрушенное войной хозяйство, но и наверстывать упущенное время, решение этих задач, без всякого преувеличения, было делом первостепенной государственной важности. Именно эти направления наложили отпечаток на формирование инфраструктуры завода – он постепенно и неуклонно оснащался необходимым сложным технологическим оборудованием: тяжелыми волочильными машинами для изготовления проволоки и цельнотянутых жил кабелей больших сечений, гидравлическими прессами, развивающими усилия в несколько тысяч тонн, для наложения сплошных алюминиевых и свинцовых оболочек, что позволило освоить выпуск кабелей с бумажно-масляной изоляцией. А эта группа выпускаемой продукции сразу позволяла решить многие задачи энергетики, транспорта и горнодобывающих отраслей,

где требовались кабели, способные работать в грунтах всех категорий, в шахтах, воде, на наклонных трассах и т.п. К слову сказать, кабели с пропитанной бумажной изоляцией играли важную роль и позволяли решить многое в электроснабжении не только в те времена, когда еще не было необходимых качественных полимерных электроизоляционных материалов. Даже теперь, в эпоху высокого уровня развития химической науки и технологии эти кабели, в силу своих уникальных свойств, в первую очередь, по надежности, сроку службы и другим важным для потребителя эксплуатационным качествам, – они и сейчас остаются и еще будут оставаться, что ни на есть, "рабочими лошадками" в системе "производитель-потребитель кабельной продукции".

Применение тяжелого крутильного оборудования давало возможность освоить выпуск одножильных и многожильных силовых кабелей с большим сечением уплотненных токопроводящих жил круглого и фасонного профилей. Это позволяло добиться лучших по тем временам технико-экономических показателей по этой группе кабельных изделий. Освоение технологии изготовления резиновой изоляции открывало перспективы выпуска многих новых маркоразмеров гибких кабелей нестационарной прокладки для горной промышленности Донбасса и других регионов. Существенное улучшение технологии тонкого и тончайшего волочения, а также эмалирования давало выход на качественно новые уровни в освоении выпуска обмоточных проводов – проводов без которых была бы немыслима работа быстро развивающихся предприятий электромашиностроения и электроаппаратостроения, как в самом Харькове, так и во многих других городах и промышленных центрах Союза. В 1960 году был построен прокатный цех и введен в действие среднесортный прокатный стан 400, что дало возможность коренным образом решить задачу поставок шинно-коллекторных и других фасонных профилей специального назначения для нужд быстро набирающих обороты предприятий тяжелого энергетического машиностроения, а им, благодаря этому, – освоить выпуск уникальных трансформаторов, гидро- и турбогенераторов не только для нужд отечественной энергетики, но, в последующем, и на экспорт во многие страны мира. Даже по современным меркам далеко не каждое солидное кабельное предприятие имеет прокатный стан с диаметром валков 400 мм, а по тем временам тем более, – на предприятие, имевшее подобное оборудование, соответственно возлагались и производственные задачи, уровень которых зачастую определялся и строго контролировался высшими органами управления экономикой страны.

Наряду с производством развивались и укреплялись хозяйствственные связи завода – он все больше и больше завоевывал себе репутацию ведущего предприятия в системе тяжелой электротехнической промышленности СССР, оглядываясь на этот этап, с 1945 по 1961 год, можно сказать: именно в этот период был сформирован облик предприятия, основная инфраструктура, производственная база и связи по кооперации. Это в дальнейшем во многом определяло его место и роль в хозяйственном механизме страны, а, как следствие, – во многом определило и его дальнейшую судьбу. Однако не следует думать, что все

проходило само по себе. За успехами еще очень молодого предприятия стоял титанический труд коллектива, труд тысяч скромных, но бесконечно преданных делу людей, которые дневали и ночевали на заводе и в интересах производства часто отодвигая проблемы личной жизни на второй план.

Последующее тридцатилетие развития завода можно характеризовать, как период расширения и наращивания темпов производства, а соответственно этому, – широкое внедрение механизации и автоматизации в технологических процессах и автоматизации процессов управления предприятием. Был освоен ряд новых перспективных кабельных изделий с применением пластмасс, кремнийорганики, стекловолокна, синтетических каучуков, новых пропиточных лаков и лаков для эмалирования. Это, в целом, позволяло существенно поднять нагревостойкость выпускаемой продукции – качества, как известно, далеко не второразрядного в кабельной технике. На заводе, на базе отечественных электронно-вычислительных машин среднего класса, был создан и успешно функционировал вычислительный центр, без которого управление массовыми товаропотоками было бы невозможным. Появились гораздо более широкие возможности инвестирования собственных средств в социальную сферу – для сотрудников предприятия был построен заводской поселок, детский сад, пионерский лагерь, туристическая база и санаторий на берегу Черного моря. Для осуществления новых масштабов производства и внедрения прогрессивных технологических процессов требовались профессионально подготовленные технические кадры высшего уровня. Прямо на заводе начал работать вечерний филиал Харьковского электромеханического техникума, который за 15 лет дал среднее техническое образование 220 работникам предприятия. Большую роль среди учебных заведений в подготовке руководящих технических специалистов играли Харьковский политехнический, Украинский заочный политехнический институты, с которыми поддерживались тесные связи также в плане научных разработок и их внедрения в производство. Особо следует отметить настоящую кузницу кадров для завода кафедру электроизоляционной и кабельной техники ХПИ, на которой, в разное время, успешно защитили свои дипломные проекты и работы по кабельной технике свыше сотни ведущих технических специалистов завода. Все это целенаправленно формировало научно-техническую политику завода, как предприятия с высоким уровнем производства. Следствием этого явилась интеграция в экономические структуры Стран экономической взаимопомощи и выход на внешние рынки – продукция завода экспорттировалась на Кубу, в Аргентину, Вьетнам, Корею, Монголию, Индию, Иран, Ирак, Сирию, Египет, Румынию, Анголу, ЮАР и многие другие страны мира. Далеко за пределами СССР завод "Южкабель" был известен как крупный оптовый поставщик кабельной продукции. Достаточно сказать, что практически все силовые кабели, поставляемые на строительство огромного металлургического комбината мирового значения в Бхилай (Индия) имели марку "Южкабель". К концу 80-х предприятие вышло на стабильно высокие количественные показатели выпуска широкой номенклатуры

продукции, которая насчитывала тысячи маркоразмеров. Но оно, как и многие другие предприятия в то время, действовало в пределах жестко централизованной системы управления экономикой, что, во многом, уже не соответствовало веяниям времени.

Централизация в системе организации взаимодействия хозяйствующих субъектов в определенных условиях может сыграть огромную роль. Особенно сильно ее преимущества сказываются в кризисные моменты истории. Благодаря жесткой централизации в управлении народным хозяйством, СССР удавалось добиваться невиданных в мировой практике макроэкономических показателей и в годы войны, и в послевоенное время, и в период возрождения. Это признавали даже наши враги. Однако, нельзя до бесконечности эксплуатировать такую систему. Возведенная в абсолют в рамках организации советского народного хозяйства, к концу 80-х, в новых условиях, она все чаще начинала давать сбои и постепенно становилась тормозом развития промышленных предприятий, являющихся костяком промышленной инфраструктуры, но лишенных элементарной самостоятельности в решении, зачастую, даже оперативных вопросов управления и своей научно-технической политики. На практике это проявилось в том, что обновление производственных фондов стало заметно отставать от потребностей, вытекавших из жизненно важного требования того времени – необходимости широкого внедрения в практику появившихся технологий. Это могло бы дать у нас и давало в других странах, где это своевременно поняли, важнейшее качество – принципиальный прорыв в новейших промышленных технологиях. Его результаты незамедлительно сказались там, где это было достигнуто, на росте производительности труда и качества промышленной продукции, обеспечив тем самым главное – ее конкурентоспособность на внутренних и внешних рынках, в масштабах государства – решение многих социальных проблем и лидерство национальных экономик в мировом экономическом процессе.

К началу 90-х завод, тем не менее, подошел с самими высокими за всю его историю валовыми показателями выпуска продукции. Как никогда были прочны его связи по кооперации внутри страны и за ее пределами. Казалось ничто не предвещало бури. Однако произошло то, чего никто не ожидал – огромное государство Союз Советских Социалистических Республик, обладавшее колossalным промышленным и военным потенциалом, способным в мгновение ока испепелить целые континенты, прекратило свое существование. Случившеесяказалось столь невероятным, что не на шутку испугало даже ярых противников СССР. Такого не могло быть! Но такое случилось. Почему случилось? Об этом еще долго будут спорить историки. Но, как говорят, история не знает сослагательного наклонения – что случилось, то случилось – на просторах бывшего СССР образовался новый Союз – Союз независимых государств.

Последствия развода СССР оказались не сразу. Экономика, как известно, скачков не терпит и, по началу, на заводе некоторое время все двигалось за счет имевшегося наката. Однако, надежды на сохранение в рамках СНГ старых, существовавших

еще в бытность СССР хозяйственных связей не оправдались. Все оказалось гораздо сложнее – из всех государственных структур именно промышленные предприятия пострадали, пожалуй, больше всего – развал экономики СССР приобрел обвальный характер. Дальше – больше. Обвальные процессы распространялись на теперь уже национальные экономики и набирали угрожающих масштабов. Катастрофически упали объемы производства тяжелой промышленности и, как следствие, завод практически лишился важнейших для него потребителей шинно-коллекторной прокатной продукции для тяжелого электромашиностроения. Завоеванные с таким трудом достижения оборачивались поражениями: практически бездействовал прокатный стан 400, в былые времена – гордость завода. Продолжали резко сокращаться объемы производства и по другим группам кабельной продукции, составляющей основу товарного выпуска. Набравшие силу центробежные тенденции мало-помалу перекочевали на предприятие: от завода начали откалываться, превращаясь в независимые малые предприятия, куски производства, а назревший как никогда вопрос: "Что делать?" продолжал оставаться без ответа.

Период борьбы за выживание случается не только у людей. Бывает такое и в судьбах предприятий. И если абстрагироваться от особенностей, то можно видеть что в 95-м завод, по своему положению, во многом напоминал тонущий корабль. Во всяком случае, до сих пор явственно видится такая аналогия потому, что именно в этот момент мне, как только что избранному коллективом руководителю предприятия, пришлось столкнуться с таким положением дел. Конечно, течение времени расставляет все на свои места и острота восприятия ушедших событий притупляется. Но, даже с удаления сегодняшнего дня, я вижу этот период именно так – любое промедление тогда или один неверный шаг в выборе пути мог бы обернуться катастрофой.

В деле управления, как и в любом другом непростом деле, существует понятие фатального события. И тот, кто занимался управлением, как бы сейчас сказали, целостного хозяйственного комплекса или хотя бы его части хорошо это знает. Фатальность управленческого решения, пожалуй, самое страшное, что может случиться на крутом повороте истории. Тогда, в середине 90-х, завод как государственное предприятие стоял перед дилеммой и должен был выбрать новую форму хозяйствования. Но этого мало. Завод, образно выражаясь, должен был вскарабкаться по почти отвесной стене. Она разделяла две, разинувшиеся как небо и земля, экономики – административно-командную и рыночную. Опробованных путей решения таких задач в наших условиях в то время еще не было. Это сейчас мы поняли, что децентрализация и акционирование, казавшиеся в то время панацеей от всех бед, сами по себе еще ничего не дают. Многие кабельные заводы, подвернувшись непродуманному раздроблению, в лучшем случае потеряли свои позиции на рынке. Многие акционерные общества в промышленности и сейчас еще не могут подняться с колен.

И здесь мы подходим к главному, к тому главному, без чего не будет работать, будь оно самое самое механизированное и автоматизированное, ни

одно производство. Все в движение, в конечном счете, здесь приводится людьми. Все на них держится, все ими решается. Но, решается или не решается, – в этом весь вопрос. И если сказать, что переломить ход событий тогда в 95-м удалось просто изменив экономический уклад, т.е. осуществив акционирование предприятия – значит не сказать почти ничего.

Требовалось несоизмеримо большее – коренным образом изменить образ мышления, когда каждый, от рабочего до директора, сознательно нес бы прямую ответственность за свое отношение к труду. И когда это свойство, помноженное на преимущества коллективного труда в новых, теперь уже рыночных условиях, сработало – тогда, надо признать, и произошел перелом.

Но осмыслить происходящее, совладать с ним – это одно, а поставить дело на практическую основу – совсем другое. И здесь трудно переоценить роль команды, профессионалов, управляющей производством, в которой каждый, в сложнейшей обстановке, способен принимать решения и нести всю полноту ответственности за их последствия. Не останавливаясь здесь на персоналиях, скажу только, что такая команда, созданная как раз в кризисный момент, команда, несомненно достойная своего коллектива, оправдала его надежды – завод не только вернул себе утраченные в силу объективных причин позиции, но и достигнул новых рубежей в условиях конкуренции. Об этом мы уже писали и любознательный читатель имеет возможность ознакомиться с этим более подробно [1].

## ПОЛИТИКА В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

Здесь же, не умаляя роли других важных факторов развития предприятия на этом этапе, хочется остановиться на его политике в области качества как направляющей современного производства вообще. Ее суть я бы сформулировал в виде одного очень короткого и емкого тезиса: качество надо не проверять, а делать. Соответственно этому была разработана **концепция технологической модернизации и технического перевооружения** предприятия, в которой можно выделить цели, средства и пути их достижения.

**Целями предприятия на данном этапе являются:**

- постоянное удовлетворение спроса и требований потребителя; выпуск высококачественной и конкурентоспособной продукции, соответствующей международным и национальным стандартам;
- непрерывное расширение рынков сбыта продукции в Украине и за рубежом;
- увеличение прибыли предприятия и роста на этой основе благосостояния его работников.

**К средствам достижения целей относятся:**

- приоритетное решение проблем качества в области технических, организационных и кадровых вопросов;
- поддержание эффективного функционирования системы менеджмента качества на основе ИСО 9001;
- освоение новых видов изделий на основе внедрения новейших промышленных технологий;
- совершенствование технологических процессов с

внедрением новых материалов, способов контроля, упаковки и маркировки продукции; проведение систематической работы по вопросам качества с поставщиками исходных материалов;

- поддержание и развитие высокой культуры производства как основы постоянного улучшения качества.

**Реализацию политики в области качества** руководство завода проводит путем:

- придания главенствующего значения делу качества на предприятии;
- доведения до коллективов подразделений цели политики в области качества и практических задач по ее реализации;
- установления в документах системы менеджмента качества ответственности персонала от рабочего до директора за выполнение требований по обеспечению необходимого уровня качества;
- осуществления систематического анализа информации о качестве продукции и принятия необходимых корректирующих и предупреждающих действий;
- организации систематического обучения и повышения квалификации всего персонала по вопросам качества;
- внедрения системы внутренних проверок, а также обеспечения достаточными ресурсами, необходимыми для совершенствования используемых техпроцессов.

Именно целенаправленная и настойчивая реализация политики в области качества заставила, помимо всего прочего, обратиться и к внедрению новейших технологий в кабельной технике – производственная база завода уже сейчас во многом опирается на современные автоматизированные и компьютеризированные технологические линии, приобретенные практически без привлечения заемных средств.

#### **НАПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕВООРУЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА**

Придерживаясь этой политики, завод с 1995 г. начинает постоянное освоение новых изделий – силовых кабелей с токопроводящей жилой сечением до 240  $\text{мм}^2$ , проводов и кабелей для водонапорных насосов и целого ряда других изделий. Для расширения производства силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией были установлены гидравлический пресс ПО-741 с усилием горячего прессования жил из алюминиевых слитков около одной тысячи тонн и пресс KW-75 для изготовления свинцовых оболочек. Совместно с Запорожским алюминиевым комбинатом завод разработал и освоил технологию прессования алюминиевых слитков без их обточки, что помимо всего прочего дает экономию около 8 % алюминия. Эта технология впоследствии стала повсеместно применяться на кабельных предприятиях Украины и СНГ.

В сотрудничестве с австрийской фирмой MAG в 1999-2001 гг. освоен выпуск эмальпроводов, в том числе с двойным покрытием, обеспечивающим повышенную стойкость к растворителям, маслам и хладагентам. Благодаря этой экологически безопасной технологии, отечественное электромашиностроение получило эмальпроводы повышенных классов нагревостойкости с температурным индексом 180 и 200.

В июле 2001 г. защищен инвестиционный проект на 9,4 млн. долларов по производству силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6...110 кВ сечением токопроводящей жилы до 1000  $\text{мм}^2$ . Для реализации проекта был построен новый цех площадью 5 тыс.кв.м., закуплено и введено в эксплуатацию, согласно разработанным сотрудниками завода технологическим схемам, высокопроизводительное современное оборудование, изготовленное по последним мировым достижениям. Для изготовления новейших образцов отечественных кабелей с изоляцией из сшитого нагревостойкого полиэтилена были установлены наклонная линия непрерывной вулканизации полиэтилена в среде сухого азота под давлением до 15 атм и температуре 450°C фирмы TROESTER (Германия), машина для скрутки токопроводящих жил фирмы CORTINOVIS (Италия), испытательное оборудование фирмы HIPOTRONICS (США) и HAEFELY (Швейцария). Управление всеми новейшими технологическими процессами и испытаниями в новом цехе было организовано на базе программного обеспечения, разработанного фирмой SIEMENS и смежными фирмами-изготовителями оборудования. Это позволило внедрить современную автоматизированную схему управления массового производства кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и отказаться от их импорта в Украину.

В 2002 г. было освоено собственное производство ПВХ-пластикатов на оборудовании фирмы REPKON (Турция).

Второй инвестиционный проект в рамках специального режима инвестиционной деятельности был реализован в декабре 2004 г. Были разработаны отечественные образцы волоконно-оптических кабелей и введен в эксплуатацию цех по их производству. Значительная часть оборудования поставлялась фирмой NEXTROM (Финляндия). Это линия окраски оптического волокна, линия изготовления оптического модуля, линия SZ-скрутки, две линии для наложения на оптические кабели защитных оболочек, линия перемотки кабелей и комплект испытательного оборудования. Отдельные узлы технологических линий дополнительно укомплектовывались оборудованием фирм WEBER and SCHER (США), MEDEK and SCHORNER (Австрия), SIKORA (Германия) и других ведущих зарубежных фирм.

В составе оборудования имеется также крутильная машина фирмы PROTON and PRODUCTS (Англия), что позволило выпускать современные оптические кабели с проволочной броней.

В мае 2006 г. введен в эксплуатацию цех по производству самонесущих изолированных проводов. Были разработаны отечественные образцы таких проводов для защищенных воздушных линий электропередачи, а также для ответвлений к вводам в жилые дома и хозяйствственные постройки. Это позволило существенно повысить экологичность, надежность и безопасность весьма разветвленной сети отечественных линий электропередачи напряжением 0,4 кВ.

В 2007 г. по технологическому процессу фирмы UPCAST (Финляндия) реализован проект производства медной катанки. Эта новейшая технология позволяет путем вытягивания из расплава медных катодов

получать высококачественную бескислородную медную катанку в 10 параллельных ручьев. В то же время был реализован проект производства полиолефинов на оборудовании фирмы ERMAFA (Германия).

В 2008 г. на заводе "Южкабель" успешно реализован еще один инвестиционный проект по освоению отечественного производства силовых кабелей с изоляцией из спитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ сечением жил до 2000 мм<sup>2</sup>, в том числе составных жил типа MILLIKEN. Это позволило впервые в СНГ освоить производство кабелей такого класса напряжений. Новый цех на заводе стал более высокой ступенью в освоении производства этой наукоемкой и высокотехнологичной современной продукции. ПАО "ЗАВОД "ЮЖКАБЕЛЬ" изготовил 9 км силового кабеля с изоляцией из спитого полиэтилена на напряжение 330 кВ для Березовской ГРЭС (Беларусь), который прошел испытание после его прокладки и сейчас успешно эксплуатируется. Вместе с тем, такие кабели прошли испытания в Европейском испытательном центре "КЕМА" (Голландия) и получили международные сертификаты качества.

В 2012 году на заводе внедрен новый инвестиционный проект по освоению производства высоконаполненных ПВХ пластиков и безгалогенных композиций полиолефинов с использованием линии компаундирования фирмы X-COMPOUND (Швейцария). Вышеуказанное оборудование обеспечивает выпуск до 1000 кг/час ПВХ пластиков и до 500 кг/час безгалогенных композиций. Эти материалы находят широкое применение в конструкциях пожаробезопасных кабелей и проводов.

Сегодня на заводе реализуется очередной инвестиционный проект в рамках долгосрочной программы технического перевооружения. Строится новый цех по производству низковольтных кабелей и гибких проводов, в том числе в огнестойком исполнении. Объем инвестиций в техническое перевооружение составляет более 300 млн. грн.

На предприятии внедрены и функционируют современные системы менеджмента качества ISO 9001 последней версии 2008 г., а также система экологического менеджмента в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 14001. Многократно прошла аккредитацию центральная заводская лаборатория на техническую компетентность в Национальном Агентстве по Аккредитации. Заводом получены лицензии на право производства кабельной продукции для АЭС, угольных шахт со взрывоопасными условиями, а также право на проведение сертификации кабелей на соответствие требованиям пожарной безопасности на собственном испытательном оборудовании.

Предприятие успешно сотрудничает в научном плане с кафедрой "Электроизоляционная и кабельная техника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", Институтом электродинамики Национальной академии наук (г. Киев), Всероссийским научно-исследовательским институтом кабельной промышленности (г. Москва), Инженерной академией Украины и другими научными организациями. Сотрудниками завода защищены пять кандидатских и одна докторская диссертации.

За разработку и внедрение в серийное производство кабелей энергетического назначения на среднее, высокое и сверхвысокое напряжения, что обеспечивает существенное повышение надежности и безопасности систем электроснабжения, в 2007 г. пятым сотрудникам завода – В.М. Золотареву, В.П. Карпушенко, Ю.А. Антонцу, Л.Г. Василю и А.Ф. Кривенко была присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники. Два сотрудника (А.Л. Обозный и В.В. Золотарев) стали лауреатами Премии Президента Украины для молодых ученых.

Сегодня завод увеличивает объемы выпускаемой продукции и выходит из кризисной ситуации 2009-2010 гг. Доля экспорта составляет 35 % в общем выпуске кабельной продукции. За последние двадцать лет работы произошло увеличение объемов производства и реализации продукции в десять раз. Расширение номенклатуры изделий завода включает более 18 тысяч марокразмеров кабелей и проводов, а сегодня доля новых изделий составляет около 3,5 %.

Конечно само по себе достижение, пусть даже высочайшего качества, еще не гарантирует от возможных провалов – в рыночной экономике, к примеру, затоваренный склад может пустить по миру и самое высокоразвитое предприятие. Такое тоже случается иногда в жизни. Но, мы с оптимизмом смотрим в будущее и не без оснований – сегодня на "Южкабеле" трудится замечательный коллектив. Он многое вынес на своих плечах и в годы войны, и в несытое послевоенное время, и в нескладный период нашей новейшей истории – он вытягивал все. Сменялись поколения, но в гуще событий всегда оставался и остается человек труда. Отдавая дань уважения простому труженику, безотносительно к профессии и положению, я преклоняюсь перед его прекрасными душевными качествами, его неиссякаемой энергией, его творческим гением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотарев В.М., Жерновников В.М., Карпушенко В.П., Кривенко А.Ф., Кудрявцева Р.И. Заводу "Южкабель" 60: Страницы истории трудового коллектива / под ред. В.М. Золотарева. – Харьков: Майдан, 2003.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zolotarev V.M., Zhernovnikov VM., Karpushenko V.P., Krivenko A.F., Kudryavceva R.I. Zavodu "Yuzhkabel" 60: Stranicy istorii trudovogo kollektiva / pod red. V.M. Zolotareva. - Har'kov: Majdan, 2003.

Поступила 08.04.2013

*Золотарев Владимир Михайлович, д.т.н., доц.  
ПАО "Завод "Южкабель"  
61099, Харьков, ул. Автогенная, 7  
тел. (057) 754-52-48  
e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua*

*Zolotaryov V.M.*

**The seventy years' history of "YUZHNCABLE" works.**

The history and achievements of YUZHNCABLE Works for the seventy years of its activity are reviewed. A concept of the domestic cable works expansion under market-economy conditions is presented.

**Key words – YUZHNCABLE Works history, achievements, cable works expansion.**

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПАО "ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ" ПО СОЗДАНИЮ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ОБРАЗЦОВ КАБЕЛЕЙ И ПРОВОДОВ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ТРЕБОВАНИЯМ МИРОВЫХ СТАНДАРТОВ

*Викладені суть та вирішення проблеми створення сучасних вітчизняних зразків кабелів і проводів в ПАТ "Завод Південкабель" за останні два десятиліття.*

*Изложены суть и решение проблемы создания современных отечественных образцов кабелей и проводов в ПАО "Завод Южкабель" за последние два десятилетия.*

### ВВЕДЕНИЕ

Концентрация электрических мощностей на современном этапе развития достигла такой степени, что необходимы кардинальные решения в области совершенствования канализации энергопотоков. На сегодняшний день решать задачи передачи и особенно распределения электроэнергии с помощью одних только традиционно применяемых для этой цели открытых воздушных ЛЭП становится практически невозможно. Все возрастающие требования ставят на повестку дня необходимость сооружения современных безопасных каналов передачи электрической энергии в виде кабельных линий. Основной элементной базой последних являются современные силовые кабели энергетического назначения, а разработка и освоение их выпуска напрямую связаны с повышением надежности и безопасности отечественных кабельных линий электропередачи.

### СУТЬ ВОЗНИКШЕЙ ПРОБЛЕМЫ

На момент обретения независимости в Украине выпускались в основном силовые кабели с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение до 10 кВ с секторными жилами, кабели с изоляцией из линейного полиэтилена с секторными жилами на напряжение до 3 кВ или с круглыми жилами на напряжение до 10 кВ. Силовые кабели с ПВХ изоляцией выпускались максимум на напряжение в 6 кВ. Все эти кабели являлись трехжильными и имели сечение жилы до 240  $\text{мм}^2$  и невысокую теплостойкость, что не удовлетворяло потребностям отечественной электроэнергетики и в первую очередь в части рабочих напряжений, низких эксплуатационных качеств и низких передаваемых мощностей. Главным препятствием на пути усовершенствования существующих и создания новых конструкций кабелей и повышения их параметров было отсутствие промышленных технологий переработки и наложения нагревостойкой изоляции с высокими диэлектрическими свойствами. С освоением химическими предприятиями выпуска компонент, позволяющих с помощью их экструзионной переработки получать непосредственно на кабельных предприятиях свитый полиэтилен, появились широкие возможности освоения новых технологий изготовления силовых кабелей энергетического назначения, и кардинального улучшения их технико-экономических показателей в целом.

### ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Повышение технико-экономических показателей силовых кабелей энергетического назначения проводилось следующими путями:

- усовершенствование существующих конструкций кабелей и использование для их изготовления новых технологий;

- разработка новых конструкций экранированных кабелей;
- разработка и использование новых первичных компонент;
- построение новых технологических схем, принципов и циклов производства;
- разработка новых электротехнологических комплексов массового производства кабелей;
- разработка нормативной базы;
- разработка испытательной базы.

В общей схеме основных технологических процессов можно выделить следующие структурные части: первичные компоненты, цикл изготовления сплошных токопроводящих жил малых сечений и проволоки, циклы изготовления кабелей на напряжение до 10 кВ, напряжением 6...110 кВ и на напряжение до 330 кВ, а также цикл переработки отходов, которые неизбежно появляются в процессе производства. Каждый из циклов изготовления кабелей завершается контролем качества готовой продукции и приемо-сдаточными испытаниями всех строительных длин и отрезков. Рассмотрим упомянутые структурные части более подробно.

### 1. РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ПЕРВИЧНЫХ КОМПОНЕНТ

Для изготовления изоляции из свитого полиэтилена применены как импортные компоненты (для сланольной и пероксидной сшивки), так и разработанные собственные составы и технологические схемы их изготовления, с использованием соответствующего оборудования (рис. 1), на основе полиолефинов и органосланцов [1]. Для улучшения, в первую очередь, пожаробезопасности кабелей с пластмассовой изоляцией были разработаны составы на основе поливинилхлоридного пластика. Во всех этих разработках использовалась отечественная сырьевая база.

Для изготовления свинцовых и алюминиевых оболочек кабелей с бумажно-масляной изоляцией по традиционной технологии прессования используются соответственно свинцовые и алюминиевые слитки. Новым является использование медных катодов для изготовления катанки методом вытягивания из расплава (рис. 2).

К традиционно используемым неметаллическим исходным компонентам относится кабельная бумага для изоляции и проводящая бумага для экранов кабелей с бумажной пропитанной изоляцией, компоненты для приготовления пропиточных составов (в том числе нестекающих), изготовления защитных покровов и пр. К новым относятся материалы (нити и полотна) для водоблокирования в кабелях 6...110...330 кВ, металлополимерные пленки и т.п.

© В.М. Золотарев, В.П. Карпушенко, Ю.А. Антонец, А.А. Науменко



Рис. 1. Линия изготовления полиолефинов и ПВХ пластиков, в том числе не распространяющих горение и низкого газодымовыделения



Рис. 2. Машина для изготовления медной бескислородной катанки путем вытягивания из расплава катодов (метод Upcast)

Сушка бумажной изоляции трехжильных кабелей осуществляется по новой схеме трехфазным током промышленной частоты взамен применявшейся до этого сушки постоянным током, что позволяет избежать возникновения очень сильных магнитных полей, возникающих в сушильно-пропиточном отделении от осушенных кабелей, смотанных в бухты (до 3 км длиной) и представляющих собой большие соленоиды со значительными токами (до 500 А).

Цикл изготовления сплошных ТПЖ малых сечений и проволоки существенно модернизирован за счет применения:

- технологии горячего прессования алюминиевых ТПЖ сечением 35...240 кв.мм и катанки сечением более 35 кв.мм из алюминиевых слитков;
- применения безотходного процесса использования слитков алюминия за счет внедрения ПАО "ЗАВОД "ЮЖКАБЕЛЬ" на Запорожском алюминиевом комбинате технологии непрерывного литья слитков с высокой чистотой поверхности, что позволило полностью отказаться от их обточки и исключить целый производственный участок;
- применения высокопроизводительного волочильного оборудования и встроенного непрерывного термического отжига жил и медной проволоки в плавовой среде;
- применение прогрессивного процесса изготовления мягкой медной катанки методом вытягивания из расплава (метод upcast).

Сюда следует отнести также применение алмазных волок с большим диаметром калибрующего пояска (до 6 мм) для волочения, а также уплотнения алюминиевых ТПЖ сечением до 120 кв.мм, например, для изготовления самонесущих изолированных проводов.

Вопросы, связанные с расчетом усилий волочения, допустимых обжатий, разработки методик определения параметров волочения и выбора переходов рассмотрены на основе вариационного принципа в [2]. Разработана математическая модель построения переходов в виде интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода при формообразовании проводниковых изделий сложного сечения с использованием функционала

$$J[z(x, y)] = \iint_{\Omega} F(x, y, z, p, q) dx dy, \quad (1)$$

где  $x, y, z$  – декартовые координаты, в которых определяется проекция неизвестной контактной поверхности  $S[z(x, y)]$  на плоскость  $z = 0$ , ограниченная профилем заготовки  $L_0(x, y)$  и конечным профилем готового изделия  $L_k(x, y)$ .

Неизвестные переходы  $L_1(x, y), L_2(x, y), \dots, L_{k-1}(x, y)$  лежат в области  $\Omega$  и являются проекциями сечения минимальной контактной поверхности плоскостями  $z = \text{const}$ . Если искать решение, исходя из условия минимума общей силы трения на контактной поверхности  $S[z(x, y)]$ , то последний функционал  $J[z(x, y)]$  достигает своего минимума, когда функция  $z(x, y)$  является решением уравнения Остроградского-Эйлера для переменных  $z, p, q$ .

Таким образом, произвольная точка  $z(x, y)$  на контактной поверхности  $S[z(x, y)]$  удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

с граничными условиями первого рода  $z(L_0) = C_0 = \text{const}, z(L_k) = C_1 = \text{const}$ .

Отсюда видно, что между задачей определения переходов и электростатической задачей Дирихле для уравнения Лапласа есть аналогия при геометрически подобных границах области  $\Omega$ .

Наиболее приемлемым методом решения такой задачи с учетом особенностей рассматриваемой области  $\Omega$  есть метод вторичных источников поля  $\sigma(M)$ , которые на границах области  $\Omega$  удовлетворяют интегральному уравнению Фредгольма 1-го рода

$$\frac{1}{2\pi} \int_{L_0+L_K} \sigma(M) \ln \frac{1}{r_{QM}} dM = \begin{cases} C_0, Q \in L_0 \\ C_1, Q \in L_K \end{cases}, \quad (3)$$

где  $Q, M$  – точки интегрирования и наблюдения соответственно,  $C_0, C_1$  – константы, которые имеют смысл электростатических потенциалов  $\phi_0$  и  $\phi_1$  на электродах с периметрами  $L_0$  и  $L_k$ ,  $r_{QM}$  – расстояние между точками  $M$  и  $Q$ .

Дальнейшей заменой неизвестной непрерывной функции  $\sigma(M)$  ступенчатой функцией  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q$  в точках  $M$  и  $Q$  с номерами 1, 2, ...,  $q$ , интегральное уравнение Фредгольма первого рода (3) сведено к системе линейных алгебраических уравнений для неизвестных плотностей зарядов  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q$ .

Символически это можно записать так

$$\|A\| \cdot \|\sigma\| = \|\phi\|, \quad (4)$$

где  $\|A\|$  – матрица ядра уравнения,  $\|\sigma\|$  – вектор-столбец неизвестных плотностей зарядов,  $\|\phi\|$  – из-

вестный вектор-столбец потенциалов на проводниках с периметрами  $L_0$  и  $L_k$ .

Система уравнений (4) решалась для наиболее распространенных секторных жил трех- и четырехжильных кабелей с углами сектора  $2\beta=120^\circ$  и  $90^\circ$ . Как известно интегральное уравнение Фредгольма первого рода является некорректно поставленной задачей математической физики. Исследования показали, что при размерности матрицы ядра  $\|A\|$ , которая равняется 798, потери устойчивости решения не наблюдалось. Для выбора переходов из набора найденных решений был разработан инженерный метод расчета силовых параметров и коэффициентов запаса, учитывающий вытяжки маршрута волочения конкретного изделия сложного сечения.

Применение процесса волочения дает возможность получать всю необходимую номенклатуру проволок и фасонных токопроводящих жил сечением до 50 кв.мм из медной катанки.

Сплошные фасонные токопроводящие жилы в диапазоне сечений 70...240 кв.мм и всю номенклатуру катанки из алюминия дает возможность получать процесс горячего прессования из слитков на разработанной технологической линии.

В основу работы такой технологической линии положен принцип формообразования изделий (секторных токопроводящих жил и других изделий) путем горячего прессования из алюминиевых слитков. Линия состоит из гидравлической прессовой установки (собственно гидравлического пресса), системы гидравлики, печи индукционного нагрева слитков, приемного устройства, системы электропитания и системы управления.

Гидравлическая прессовая установка состоит из главного силового цилиндра с поршнем и прессштемпелем, контейнера с гильзой и элементами индукционного подогрева контейнера током промышленной частоты, передней траверзы, матрицы. Для замены матрицы предусмотрены два вспомогательных гидроцилиндра, обеспечивающие необходимое перемещение передней траверзы. Еще один вспомогательный гидравлический цилиндр используется как привод механизма подачи слитков от входа к выходу печи индукционного нагрева слитков. Основным узлом системы гидравлики является трехплунжерный насос Г-305А, развивающий давление 320 атм при подаче рабочей жидкости (минерального масла) 750 л/мин. Здесь же имеется также гидронасос механизма подачи слитков, обеспечивающий подачу рабочей жидкости 100 л/мин при давлении 25 атм. Основным элементом печи индукционного нагрева слитков является водоохлаждаемый индуктор. В электроприводе системы гидравлики использован двигатель постоянного тока МП 49,70-6К мощностью 500 кВт и скоростью вращения 315/1000 об/мин, питаемый напряжением 440 В. Система электропитания обеспечивает подачу и распределение промышленного трехфазного напряжения 50 Гц, 380 В между системами, узлами и элементами линии и их защиту в аварийных режимах работы.

Работает линия следующим образом. Алюминиевые слитки (5 штук подряд один за одним) подаются толкателем механизма подачи слитков в печь индукционного нагрева, которая обеспечивает их основной нагрев до температуры 420 °C. Для лучшей распрессовки в гильзе контейнера и во избежание образования воздушных раковин, перед подачей слитка в контейнер, передняя часть его нагревается до более вы-

сокой температуры, составляющей примерно 450 °C. Этот, так называемый градиентный нагрев слитка, обеспечивается переключением числа витков индуктора с помощью тиристорных коммутаторов узла управления нагревом слитков. Подготовленный таким способом слиток движется сам по направляющим роликам и устанавливается на оси прессштемпеля и матрицы. Прессштемпель, приводимый в движение поршнем главного силового цилиндра подает слиток во внутреннюю полость гильзы контейнера. После этого начинается прессование слитка на прямой матрице усилием, развиваемым поршнем главного силового цилиндра, максимальное значение которого составляет 1250 т. Так как передняя часть слитка нагрета сильней, то именно в этой части происходит заполнение гильзы алюминием и его выдавливание через матрицу. Синхронно с движением прессштемпеля начинает работать приемное устройство и готовая выпрессованная токопроводящая жила укладывается на барабан (№ 14... № 20), устанавливаемый на этом приемном устройстве. Сразу после выхода из матрицы токопроводящая жила в процессе движения охлаждается водой. После выпрессовывания слитка в гильзе остается некоторый пресс-остаток. Прессштемпель отводится назад и механизм подачи слитков подает следующий нагретый до необходимой температуры слиток. Прессштемпель снова подает слиток в гильзу контейнера, а передняя, нагретая сильнее часть слитка под давлением сваривается с пресс-остатком и происходит его выпрессование. Далее процесс повторяется циклически.

На выходе из печи индукционного нагрева слитков, их температура измеряется выдвижной термопарой, а сам процесс нагрева контролируется системой управления. Время перезарядки слитка диаметром 175 мм и длиной 418 мм составляет 20 с. Выбранные параметры линии позволяют прессовать токопроводящие жилы сечением 70... 240 кв.мм со скоростью 120 м/мин в один или два ручья. Линия имеет длину 29,15 м, ширину 11,4 м и высоту – 2,78 м. Ее масса составляет 66,7 т, а установленная мощность (без печи) – 515 кВт.

## 2. РАЗРАБОТКИ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 10 кВ

Цикл изготовления кабелей до 10 кВ включает в себя как изготовление кабелей с бумажной пропитанной изоляцией по традиционной технологии, так и изготовление кабелей с пластмассовой изоляцией на упомянутое напряжение. Новым является применение изоляции из силанольносшитого полизтилена на основе как импортируемых, так и разработанных компонент на напряжение до 6 кВ (с круглыми экранированными жилами) и с секторными жилами. Существенно улучшена пожаробезопасность кабелей за счет применения (в покровах) не распространяющих горение (для кабелей с индексом "нг") составов, и составов с низким газодымовыделением (для кабелей с индексом "нгд"). Здесь использована традиционная схема общей скрутки изолированных жил с помощью планетарной крутильной машины (MKRA). Такая схема при приемлемом диаметре вращающейся планетарной клети, обеспечивающей открутку, позволяет разместить на ней максимум 3 барабана № 15, т.е. диаметром 1500 мм, что в сочетании со вспомогательным устройством позволяет скручивать сердечник кабеля, состоящий максимум из четырех жил, сечением, как правило, не более 240... 300 кв.мм для обеспечения заданных строительных длин кабелей.

Именно эта схема скрутки является главной причиной, которая не позволяет скручивать жилы сечением выше 300 кв.мм.

Для этого цикла изготовления характерными являются испытание пластмассовой изоляции электрическим напряжением на проход в технологических линиях. Здесь характерны физические процессы, приводящие к транспорту электрических зарядов замкнутым слоем диэлектрика на проводящей подложке, что необходимо учитывать при выборе средств испытания напряжением на проход в технологических экструзионных линиях.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПО СОЗДАНИЮ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ 110...330 кВ

В этих циклах были применены новые принципы скрутки и наложения изоляции с помощью строенной экструзионной головки. Ниже рассматриваются основные особенности этих процессов с точки зрения их практической реализации.

Главной составной частью технологии изготовления кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ является наклонная линия вулканизации полизиэтилена в среде сжатого до 15 атм. сухого азота (рис. 3).



Рис. 3. Линия изготовления кабелей на напряжение 110 кВ (справа – вулканизационная труба, слева – линия общей скрутки жил в сердечник кабеля с помощью крутильной машины Drum twister)

В ней использован принцип наложения трехслойной изоляции строенной экструзионной головкой на свободно провисающую в вулканизационной трубе токопроводящую жилу. Постоянная провисания жилы составляет 130 м. При изменении сечения жилы усилие в нижней точке обеспечивается регулируемым широтно-импульсным приводом тягового устройства. Устройство подкручивания жилы обеспечивает ее

осевое кручение с шагом около 15 м и получение, за счет более эффективного охлаждения, корочки тонкого слоя застывшего полизиэтилена на внешней поверхности изоляции, что препятствует ее стеканию вдоль жилы и возникновению эксцентризитета.

Схемы скрутки могут быть построены по различным принципам.

Традиционный принцип скрутки использует вращение отдающего устройства (или клети крутильной машины) с угловой скоростью  $\omega_1$ , а приемное устройство обеспечивает поступательную линейную скорость  $V$ . Соотношением  $\omega$  и  $V$  определяется шаг скрутки готового изделия. Главный недостаток такой схемы – большой диаметр крутильной клети  $D$ , который примерно втрое больше диаметра барабана с наносимыми элементами скрутки (проводкой, готовыми изолированными жилами и т.п.). Так, например, при применении отдающих барабанов диаметром всего 1,6 м в таких схемах диаметр клети  $D$  уже составляет около 5 м. Диаметры кабелей на напряжение 110...330 кВ составляют 70 мм и более, что требует применение барабанов размером 2...3 или даже 3,6 м. Это обстоятельство делает практически невозможным применение традиционных схем общей скрутки жил или наложения проволочных элементов.

Поэтому, для изготовления кабелей с изоляцией из сшитого полизиэтилена применен принцип вращения самого кабеля вокруг собственной оси с помощью вращающихся (вокруг этой же оси со скоростью  $\omega_1$ ) тягового, отдающего и приемного устройства одновременно в одну сторону.

Этот принцип был использован при разработке схемы наложения проволочного экрана и общей скрутки изолированных жил или скрутки жил большого сечения (более 1000 кв.мм), состоящих из пяти предварительно скрученных и уплотненных секторных жил кабелей 6...330 кВ.

При наложении проволочного экрана схема скрутки работает так. Сердечник кабеля сходит с отдачника и проходит сквозь обмотчик для наложения методом обмотки полупроводящего водоблокирующего полотна. Проволоки, из которых состоит экран, сходят из неподвижных катушек, число которых может достигать 96 штук. Скрутка экрана происходит в калибре за счет вращения сердечника кабеля вокруг собственной оси, что обеспечивается вращением отдающего устройства, приемного устройства и тягового устройства с угловой скоростью  $\omega_1$ . На экран из медных проволок в соответствии с разработанными техническими условиями Украины на такие кабели накладываются 2 медные ленты в противоположную наложению проволок сторону.

При общей скрутке жил с неподвижных отдающих устройств сходят 5 жил и скручиваются в калибре за счет вращения тягового устройства и приемного устройства с угловой скоростью  $\omega_1$  вокруг оси кабеля. Кроме того, отдающие устройства могут вращаться в сторону, противоположную направлению общей скрутки и, тем самым, – обеспечивать открутку круглых жил. При общей скрутке жил большого сечения из пяти секторов, последние уже уложены на барабан с подкруткой и их открутка не производится.

Применение принципа скрутки за счет вращения самого кабеля вокруг собственной оси позволяет принципиально решить задачи разработки технологических схем наложения проволочного экрана, брони, проводящих и полупроводящих лент в экране для диаметров кабеля 70 мм и более при диаметрах барабанов 2...3 м.

бана приемного устройства до 3,6 м и общей высоте крутильной машины практически определяемой только этим габаритом. Реализовать такую технологическую схему при использовании традиционных схем скрутки с вращающимися клетями, например, при количестве отдающих катушек равном 96 (как это необходимо при наложении экрана) было бы практически невозможно. Следует отметить, что получение коэффициента заполнения сечения жилы металлом 0,75 и выше невозможно получить для круглых жил без их уплотнения.

Описанные выше схемы позволяют получать общий коэффициент заполнения не менее 0,85 даже для составных жил, скрученных из пяти предварительно уплотненных секторных жил. Это позволяет технологически решить вопросы изготовления жил крупных сечений (до 2000 кв.мм) для кабелей на напряжение до 330 кВ.

Применение этих принципов позволило разработать и реализовать впервые в СНГ и Украине промышленный выпуск кабелей с изоляцией из теплостойкого сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ [3].

Параллельно с выпуском силовых кабелей были проведены необходимые исследования, разработаны конструкции и наложен выпуск современных волоконно-оптических кабелей. В них может использоваться до 12 оптических модулей по 12 оптических волокон в каждом, что соответствует лучшим мировым достижениям в этой области техники.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Контроль качества готовой продукции (приемо-сдаточные испытания) включают в себя, прежде всего, проверку всех строительных длин переменным напряжением, для кабелей до 110 кВ – контроль уровня частичных разрядов (ЧР), а для кабелей напряжением выше 150 кВ – дополнительно измерение угла диэлектрических потерь в изоляции, который может сильно изменяться в зависимости от удельной проводимости материала полупроводящих пластмассовых экранов по жиле и по изоляции. Основные параметры и схемы испытательных установок с использованием принципа резонансного возбуждения колебательного контура приведены в [3]. Как показали исследования, собственный уровень шумов установок для контроля уровня ЧР не превосходит 1 пКл.

#### 5. РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ОБРАЗЦОВ ПРОВОДОВ

Необходимые исследования были проведены также по разработке современных обмоточных проводов для отечественного электромашиностроения и электроаппаратостроения. С использованием современных эмаль-лаков освоено производство базовых типов обмоточных эмаль-проводов марок ПЭИ1-180-МЭК, ПЭИ2-180-МЭК, ПЭИДХ1-200-МЭК, ПЭИДХ2-200-МЭК, ПЭУ1-155, ПЭУ2-155 с температурными индексами 155...200 градусов Цельсия. Их эмалевая изоляция изготавливается с использованием полизифиримидных, полiamидимидных и модифицированных полиуретановых смол. На основе этих эмаль-проводов разработаны медные круглые обмоточные нагревостойкие провода с эмалево-стекловолокнистой изоляцией марок ПЭТСДКТ и ПЭТВСД с температурным индексом 180 и 155 градусов Цельсия соответственно.

Одним из важнейших и бурно развивающихся направлений является разработка самонесущих изолированных проводов на напряжение до 1 кВ марок СИП-1, СИП-2 с неизолированной несущей нулевой жилой, СИП-1А, СИП-2А с изолированной несущей жилой, а также СИП-4, СИП-5, СИП-5нг без несущей жилы. Сечение каждой жилы в трехфазном исполнении проводов может достигать 120 кв.мм, а их изоляция выполнена из сианольно сшитого полиэтилена.

Также разработаны конструкции и освоено производство защищенных проводов с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 35 кВ, а при необходимости и до 130 кВ включительно. Их использование в сетях с изолированной нейтралью позволяет существенно повысить надежность и безопасность электроснабжения.

#### ВЫВОДЫ

Предложенные технические решения, схемы и принципы построения современных электротехнологических комплексов позволило решить проблему промышленного выпуска в Украине современных силовых кабелей и проводов энергетического назначения напряжением до 330 кВ, соответствующих по своим показателям требованиям мировых стандартов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на винахід № 83826, Україна, МПК С 08L 83/04. Здатна до зшивання композиція/Васильтєць Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод "Південкабель", заявл. 01.11.2005, опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.
2. Бузько С.В. Метод допускового контроля переменных технологических профилей проводниковых кабельных изделий: Дис...канд.техн.наук. – Харьков, 2011.
3. Золотарев В.М. Электротехнологический комплекс для производства высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей с полимерной изоляцией: Дис.докт.техн.наук. – Харьков, 2010.

**Bibliography (transliterated):** 1. Patent na vinahid № 83826, Ukraina, MPK S 08L 83/04. Zdatna do zshivannya kompoziciya/Vasilec' L.G., Zolotar'ov V.M., Karpushenko V.P. ta in.; zayavnik ta patentovlasnik ZAT zavod "Pivdenkabel'", zayavl. 01.11.2005, opubl. 26.08.2008, Byul. № 16. 2. Buzko S.V. Metod dopuskovoogo kontrolya peremennyh tehnologicheskikh profilej provodnikovyh kabel'nyh izdelij: Dis...kand.tehn.nauk. - Har'kov, 2011. 3. Zolotarev V.M. 'Elektrotehnologicheskij kompleks dlya proizvodstva vysokovol'tnyh i sverhvysokovol'tnyh kablej s polimernoj izolyacijei: Dis.dokt.tehn.nauk. - Har'kov, 2010.

Поступила 15.05.2013

Золотарев Владимир Михайлович, д.т.н.,  
Карпушенко Василий Петрович, к.э.н.,  
Антонец Юрий Афанасьевич, к.т.н.,  
Науменко Алексей Антонович, к.т.н.  
Публичное акционерное общество "Завод Южкабель",  
61099, Харьков, ул. Автогенная, 7  
тел.(057) 7545248  
e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Zolotarjov V.M., Karpushenko V.P., Antonets Y.A., Naumenko A.A.  
**Research and development of state-of-the-art world-class cables and wires in "YUZH CABLE" works public company.**  
The kernel and solutions to the problem of designing state-of-the-art domestic cables and wires meeting world standard requirements in "YUZH CABLE Works" Public Company are presented.

**Key words – research, state-of-the-art cables and wires, world standard requirements.**

## АНТОЛОГІЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 15: ИЗОБРЕТЕНИЕ ТРАНСПОРТА

*Наведено короткий нарис з всесвітньої історії винаходу людством основних транспортних засобів на нашій планеті, що використовують енергію працюючих двигунів того або іншого вигляду.*

*Приведен краткий очерк из всемирной истории изобретения человечеством основных транспортных средств на нашей планете, использующих энергию работающих двигателей того или иного вида.*

### ВВЕДЕНИЕ

Из всемирной истории развития человечества известно, что многие тысячелетия *на сущее* основным транспортным средством для людей и перемещаемых грузов, не считая выючных животных, были двух- и четырехколесная коляски (фаэтон) и телега, запряженные лошадьми [1]. Великим техническим открытием в истории землян оказалось изобретение колеса, уходящее в далекое прошлое нашей цивилизации, прошедшее свой весьма длинный путь совершенствования и оказавшееся в дальнейшем необходимым атрибутом (это понятие происходит от латинского слова "*attributum*" – "неотъемлемая принадлежность чего-нибудь" [2]) все той же коляски (телеги). *На воде* люди издревле научились перемещаться при помощи весельных лодок, речных судов и морских кораблей, оснащенных парусами и движущихся с использованием энергии ветра, рождающегося в земной атмосфере из-за разности воздушных давлений между ее нагретыми и охлажденными газообразными массами [1]. *По воздуху* еще чуть больше столетия тому назад люди перемещались только в своих снах или народных сказках. Тем не менее, по образному высказыванию в начале 20-го века известного российского ученого-механика в области аэрогидродинамики, профессора Н.Е. Жуковского (1847-1921 гг.) "...человек полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу своего разума" [3]. Человеческий мир, как всем нам хорошо известно, разнообразен. Поэтому среди одаренных людей всегда находились такие, какие предметно задумывались над возможностью более быстрого и комфортного перемещения больших групп людей (пассажиров), тяжелых гражданских и военных грузов по суше, по воде, под водой и по воздуху. После изобретения людьми в конце 18-го века парового двигателя (ПД), а затем в конце 19-го столетия двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [1, 3] для работающих над данной важной технической проблемой инженеров-конструкторов такие возможности стали приобретать реальные технические очертания. На взгляд автора, актуальной в области истории техники является задача, раскрывающая эволюцию создания землянами машинных транспортных средств (МТС), использующих для своего перемещения по суше, по воде, под водой и по воздуху энергию работающих двигателей.

### 1. ИЗОБРЕТЕНИЕ ПАРОВОЗА

Как известно, паровозом называется автономное МТС с паросиловой установкой или, иначе говоря, это вид транспорта на рельсах, использующий в качестве двигателя паровую машину [4]. Кстати, термин "*паровоз*" имеет русские этимологические корни. Изобретение этого слова приписывается российскому книгоиздателю середины XIX века Н.И. Гречу [4].

Паровоз оказался первым в мире тяговым МТС, передвигающимся по уложенным на поверхность земли со шпалами металлическим рельсам. Данные из истории техники говорят о том, что *паровоз* является одним из первых уникальных технических средств, созданных человеком. Именно благодаря нему на нашей планете появился железнодорожный транспорт. Роль паровоза в истории человечества трудно переоценить. Остановимся вкратце на истории создания паровоза (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид мощного американского паровоза типа UP 3985 "Challenger" середины 20-го столетия [4]

Следует сразу указать, что паровоз является техническим изобретением не одного человека, а многих поколений инженеров и механиков. Тем не менее, первым, кто сумел создать катящуюся по чугунным рельсам паровую повозку (рис. 2), стал талантливый английский инженер Ричард Тревитик [4]. В 1804 году Р. Тревитик получил патент на изобретение паровоза, использующего ПД, впервые построенный в 1784 году выдающимся английским механиком Дж. Уаттом [3]. Поэтому 1804 год считается официальным годом "рождения" этого вида МТС. Данный паровоз оказался мало похожим на свои будущие потомки – на "железного коня", приведенного на рис. 1. Его ПД содержал лишь один цилиндр, который через кривошипо-шатунный механизм раскручивал большое колесо-маховик, от которого через зубчатую передачу приводились в движение обе колесные пары этого МТС. Источником тепла в паровозе Тревитика весом около 5 т, развивавшего на чугунных путях скорость до 8 км/ч, служил уголь, забрасываемый в топку кочегаром. В 1811 году в Англии предпринимается первая попытка применения паровоза для вождения вагонеток с углём. Однако при этом лёгкий паровоз не смог потянуть тяжёлый состав с вагонетками. Он буксовал на месте. Из-за этого был сделан неправильный вывод о невозможности применения паровоза на гладких рельсах. Поэтому в 1812 году для Миддлтонских копей был создан паровоз "*Бленкинсон*", в котором сила

© М.И. Баранов

тяги реализовывалась за счёт зубчатого колеса, катящегося по дополнительной зубчатой рейке, проложенной рядом с двумя основными рельсами путей.

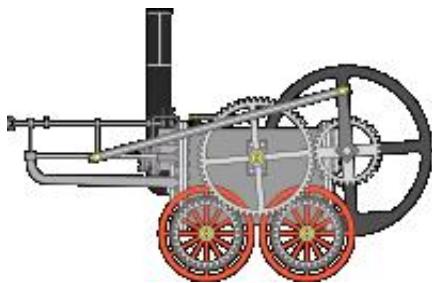


Рис. 2. Ретроконструкция первого в мире парового локомотива (паровоза) начала 19-го века английского изобретателя Р. Тревитика, перемещавшегося по гладким рельсам [4]

Английские изобретатели Блэкett и Гедли вскоре убедительно показали, что зубчатая передача тягового усилия на рельсы только тормозит локомотив. Заметим, что слово "локомотив" происходит от французского "lokomotive" – "силовая тяговая машина" [2]. Их усовершенствованный под техническим руководством Уильяма Гедли паровоз с гладкими колесами, получивший название "Пыхтящий Билли", в период 1815–1865 гг. активно использовался на английских угольных шахтах (ныне он находится на заслуженном "отдыхе" в Лондонском музее техники [1]).

В 1814 году американский машинный мастер Джордж Стефенсон разработал знаменитую конструкцию паровоза под названием "Блюхер" (рис. 3), двигавшегося со скоростью более 10 км/ч [1]. Отметим и то, что результаты работ Дж. Стефенсона в 20-е годы 19-го века по усовершенствованию железнодорожных рельсов показали, что их необходимо делать не из хрупкого чугуна, а из прочной стали. С тех пор во всем мире придерживаются этих рекомендаций.



Рис. 3. Внешний вид макета-экспоната паровоза начала 19-го века американского изобретателя Дж. Стефенсона [1]

27 сентября 1825 года в США была открыта первая в мире общественная железная дорога по маршруту Стоктон – Дарлингтон [4]. Именно по ней паровоз, управляемый самим Дж. Стефенсоном, и провез первый в мире груженый углем, мукой и 600 пассажирами поезд, состоящий из 34 вагонов [1, 4]. Это историческое событие сделало Дж. Стефенсона знаменитым.

Укажем, что в России первый паровоз с учетом английского опыта в области паровозостроения был создан на Нижнетагильском заводе (Урал) в 1834 году Ефимом (отцом) и Мироном (сыном) Черепановыми (рис. 4) [1, 4]. Скорость этого паровоза с грузовым вагоном весом 3,3 т составляла до 16 км/ч. 6 ноября 1836 года поезд с паровозной тягой прошел по первой в России Царскосельской железной дороге [4]. Паровозы на ней при этом были импортного производства.



Рис. 4. Внешний вид макета-экспоната паровоза первой половины 19-го века знаменитых российских механиков-изобретателей Ефима и Мирона Черепановых [4]

Началом русского паровозостроения следует считать 1845 год, когда Александровским заводом в г. Санкт-Петербурге были выпущены первые грузовые и пассажирские паровые локомотивы. 1 ноября 1851 года была введена в строй крупнейшая на тот момент времени в мире двухпутная железнодорожная магистраль Москва – Санкт-Петербург [4]. К 1869 году крупнейшим локомотивостроительным предприятием в России становится Коломенский завод. К этому времени начинает формироваться российская школа паровозостроения. В 1870 году профессором Санкт-Петербургского технологического института издаётся первый в России учебник "Курс паровозов". В 1880 году под руководством инженера А.П. Бородина при Киевских мастерских организуется первая в мире лаборатория по испытанию паровозов. 7 сентября 1902 года на русские железные дороги поступает паровоз типа Бп 181 – первый из паровозов российской постройки, выпущенный с пароперегревателем. Этот паровоз экономил до 25 % воды [4]. Далее от него на железной дороге трудовую эстафету принял паровоз серии Э. 6 ноября 1931 года в бывшем СССР на трудовую железнодорожную вахту поступил новый паровоз типа ФД. Последние типы паровозов внесли огромный вклад в великую победу советского народа над фашизмом в период 1941–1945 гг. 29 июня 1956 года Коломенский завод выпускает последний в СССР пассажирский паровоз типа ПЗб-0251 (рис. 5). В конце 1956 года Ворошиловградский паровозостроительный (переименованный вскоре в тепловозостроительный) завод построил последний магистральный грузовой паровоз советского производства типа ЛВ-522. В 1957 году на Муромском паровозостроительном заводе был прекращён выпуск последней в СССР серии маневровых паровозов типа 9Пм. Тем не менее, паровозная тяга использовалась в СССР в регулярном железнодорожном сообщении до середины 1970-х годов. В настоящее время паровозы используются только при выполнении ретропоездок, имеющих развлекательно-познавательную функцию.

Что касается скоростных качеств паровоза, то укажем, что мировой рекорд скорости для паровозов был установлен в Англии 3 июля 1938 года. В этом случае паровоз серии А4 № 4468 "Mallard" ("Дикая утка") достиг скорости 125 миль/ч (около 202 км/ч) [4]. Абсолютный отечественный рекорд скорости для паровозов ведущего в бывшем СССР Коломенского завода был установлен 29 июня 1938 года, когда скоростной пассажирский поезд на линии Ленинград – Москва достиг скорости в 170 км/ч [4]. В заключение приведем согласно [4, 5] принципиальную схему устройства паровоза 2-ой половины 20-го века (рис. 6).



Рис. 5. Общий вид музейного экспоната последнего пассажирского паровоза советской постройки типа П36-0251 [4]

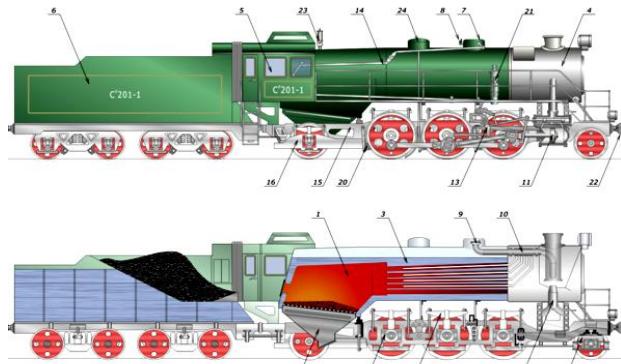


Рис. 6. Принципиальная конструктивная схема построения паровоза: 1 – топка; 2 – зольник; 3 – паровой котёл; 4 – дымовая коробка; 5 – будка; 6 – тендер; 7 – сухопарный колпак; 8 – предохранительный клапан; 9 – клапан регулятора; 10 – пароперегреватель; 11 – паровая машина; 12 – конус; 13 – парораспределительный механизм; 14 – привод регулятора; 15 – экипаж; 16 – поддерживающая тележка; 17 – бегунковая тележка; 18 – букса; 19 – рессорное подвешивание; 20 – колодка тормоза; 21 – паровоздушный насос; 22 – сцепное устройство; 23 – свисток; 24 – песочница

Согласно данным рис. 6 все зарубежные и отечественные паровозы, несмотря на разнообразие их конструкций, имеют три основные взаимосвязанные части: паровой котёл, паровую машину и экипаж. Самым массовым в мире паровозом оказался российский (советский) паровоз серии Э (рис. 7). Этот тип паровоза строился в период с 1912 по 1956 гг. на трёх десятках заводов в шести странах мира. За это время было построено не менее 10,8 тысяч паровозов этой серии [4].



Рис. 7. Отечественный паровоз серии Э, оказавшийся самым массовым в мире локомотивом с паровой силовой тягой [4]

## 2. ИЗОБРЕТЕНИЕ ТЕПЛОВОЗА И ЭЛЕКТРОВОЗА

Основным недостатком паровоза был его низкий КПД, не превышавший для лучших типов 9,3 % [4]. Поэтому уже с 20-х годов прошлого столетия остро всталась проблема разработки новых более эффективных видов локомотивов. Первым среди них оказался **тепловоз**, использующий в качестве силовой тяговой машины ДВС с КПД до (35-44) % [3, 5]. В 1924 году в

бывшем СССР стали появляться первые тепловозы, а в 1931 году было налажено их серийное производство. Так на советской железной дороге появились первые отечественные тепловозы серии ЭЭЛ. Отметим, что в 1937 году их производство было прекращено. Причиной тому послужило отсутствие на то время в нашей стране надлежащей производственной и ремонтной базы. Указанные тепловозы быстро показали свою высокую экономичность перед паровозами, затрачивая примерно в 5 раз меньше топлива на единицу полезной работы [4]. После Великой отечественной войны (ВОВ) в 1947 году Харьковский паровозостроительный завод перешёл на крупносерийное производство тепловозов, необходимых в большом количестве для восстановления на европейской части СССР разрушенного ВОВ народного хозяйства [5].

В 1933 году на советских магистральных железных дорогах появился новый вид неавтономной локомотивной тяги – электровозная, осуществляемая соответственно при помощи электровозов [6]. **Электровоз** приводится в прямолинейное движение электродвигателями, установленными в нём и получающими электроэнергию из внешней электросети через тяговые подстанции и контактную сеть. Данные электродвигатели называются тяговыми электродвигателями (ТЭД). Отметим, что ТЭД в электровозе могут работать также и в режиме генератора. Это свойство используется для электрического торможения электровоза. Если электроэнергия, вырабатываемая при вращении вала ТЭД, гасится на тормозных реостатах, то это называется реостатным торможением. В случае, когда электроэнергия от ТЭД возвращается в контактную сеть, то такое торможение электровоза называется рекуперативным. Несмотря на более высокие начальные затраты, вызванные строительством контактной сети, тяговых подстанций и изредка целых электростанций, электровозы по сравнению с паровозами были более надёжны в эксплуатации и их мощность мало зависела от температуры окружающей среды. В послевоенном 1947 году Новочеркасский паровозостроительный завод полностью переключился на выпуск электровозов (рис. 8). Укажем, что в России и Украине на магистральных железных дорогах для электровозов используются два типа тока: переменный частотой 50 Гц и напряжением 25 кВ (например, для локомотивов типа ВЛ80 и ЧС4) и постоянный напряжением 3 кВ (например, для локомотивов типа ВЛ10 и ЧС2) [6]. В других странах мира, в зависимости от принятых там стандартов в системах питания электрифицированных железных дорог, применяются электровозы с иным энергопотреблением (например, переменного тока напряжением 15 кВ) [6].

На рис. 9 приведен общий вид современного отечественного серийного электровоза типа ЭП1М [1].



Рис. 8. Советский электровоз типа ВЛ80Т, работающий от переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 25 кВ [6]



Рис. 9. Общий вид серийно выпускаемого в 21-ом столетии отечественного электровоза типа ЭП1М для перевозки по железной дороге крупнотоннажных грузов [1]

Отметим, что в мире существуют при небольшом распространении и полуэкзотические бесконтактные электровозы. В этом случае вдоль железнодорожных путей прокладывается токонесущая шина, на которую подаётся ток высокой частоты. На таких электровозах устанавливается электромагнитная катушка, в которой от поля указанной шины индуцируется высокочастотный ток, необходимый для работы их ТЭД [6].

### 3. ИЗОБРЕТЕНИЕ АВТОМОБИЛЯ

**Автомобиль** стал массовым видом транспорта после того, как на него установили ДВС. Первым это сделал в 1885 году немецкий инженер-конструктор Карл Бенц [7]. На рис. 10 показан внешний вид двухместного автомобиля К. Бенца, на который он в 1886 году без соавторов изобретения получил германский патент [7]. Одноцилиндровый бензиновый ДВС, созданный ранее выдающимися немецкими инженерами-изобретателями Г. Даймлером и К. Майбахом [3] и установленный на данный автомобиль К. Бенца, имел мощность всего около 1 л.с. (до 0,735 кВт). На рис. 11 изображен внешний вид немецкого автомобиля типа "Мерседес 35 HP", изготовленного уже в 1902 году. Из рис. 10, 11 видно, что за 17 лет в Германии произошло резкое развитие автомобильной отрасли. Выпускаемые автомобили существенно превосходили как по техническим характеристикам, так и дизайну своего предшественника-прототипа согласно рис. 10.

На рис. 12 приведен один из шедевров немецкого автомобилестроения 30-х годов 20-го века – автомобиль ручной сборки типа "Мерседес-Бенц 770" с восьмицилиндровым бензиновым ДВС рабочим объемом 7655 см<sup>3</sup> и мощностью в 200 л.с. (до 147 кВт), изготовленный по иностранному спецзаказу и принадлежавший японскому императору Хирохито [7].

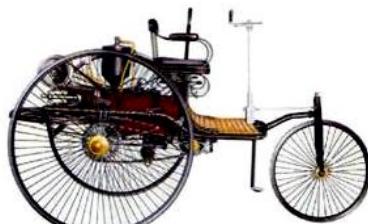


Рис. 10. Первый в мире автомобиль известного немецкого механика-изобретателя К. Бенца 1885 года выпуска [7]



Рис. 11. Внешний вид двухместного немецкого автомобиля типа "Мерседес 35 HP" 1902 года выпуска [7]



Рис. 12. Немецкий четырехместный пассажирский автомобиль типа "Мерседес-Бенц 770" 1928 года выпуска [7]

В послевоенные годы усилиями автоконцерна "Мерседес" европейский авторынок стал насыщаться недорогими легковыми автомобилями "Мерседес-Бенц 170V" и грузовиками. В настоящее время этой автофирме на "пятки" наступают азиатские "тигры".

В последние десятилетия на мировой автомобильный рынок все активнее продвигается **электромобиль** [8]. В электромобиле, как и в электровозе, главной движущей силой является ТЭД. В основу работы всех типов ТЭД, как известно, положен принцип электромагнитной индукции, базирующийся на явлении, связанном с возникновением электродвижущей силы в замкнутом электрическом контуре (витках обмотки) при изменении внешнего магнитного потока. В электромобиле могут применяться ТЭД как постоянного, так и переменного тока. Их основная задача заключается в передаче крутящего момента на двигатель электромобиля. КПД для ТЭД электромобиля составляет до 95 % [8]. Основными отличиями современного ТЭД для электромобиля от традиционной электромеханической машины, используемой в системах электропривода, являются его сравнительно большая мощность и компактность, вызванные ограниченностью используемого для его установки пространства. В последние годы в качестве ТЭД для электромобиля инженеры-конструкторы успешно используют систему "электромотор-колесо" (рис. 13) [8]. Считается, что оптимальный общий вес автомобильной системы "электромотор-колесо" должен составлять не более 30 кг. Инженерам-конструкторам фирмы "Michelin" удалось вписаться в эти требования. Созданный ими ТЭД "Active Wheel" весит всего 7 кг, а остальная механика системы укладывается в 11 кг [8].

Электромобиль с ТЭД, как и традиционный автомобиль с ДВС, прошел длинный путь своего технического усовершенствования. На рис. 14 представлен общий вид американского пассажирского электромобиля заводской сборки 1-ой четверти 20-го века [8].



Рис. 13. Внешний вид современной автомобильной системы "электромотор-колесо", применяемой в электромобилях [8]



Рис. 14. Великий американский электротехник Т. Эдисон у своего электромобиля типа "Detroit Electric" [8]

Главным минусом электромобилей первой половины 20-го столетия была достаточно сложная система подзарядки их аккумуляторов. Разработав и внедрив передовую систему подзарядки аккумуляторов электромобиля (рис. 15), производители этого нового вида электротранспорта существенно продвинулись в количестве продаваемых населению электромобилей.



Рис. 15. Внешний вид современной электрозарядной станции (слева) в США (г. Сан-Франциско) и переносной вилки (справа) для заряда аккумуляторов электромобиля [8]

На рис. 16 показан общий вид современного серийно выпускаемого ныне в США электромобиля [8]. В настоящее время мировым лидером по производству электрического автотранспорта стал Китай. Считается, что основным фактором, сдерживающим массовое производство в мире электромобилей, является их малый спрос, обусловленный их сравнительно высокой стоимостью и малым пробегом от одной зарядки до другой [8].



Рис. 16. Внешний вид современного американского опытного электромобиля среднего класса типа "Chevrolet Volt" [8]

Заметим, что в настоящее время литиевая аккумуляторная батарея ёмкостью 24 кВт·ч при ее стоимости до 9000 долларов США и средних условиях движения (скорость от 60 до 90 км/ч, только ближний свет фар, без отопления салона и без кондиционера) позволяет электромобилю проехать около 160 км [8]. Использование при его поездке кондиционера, отопителя салона, движение с частым разгоном/торможением, движение со скоростью более 90 км/ч и полная загрузка электромобиля пассажирами или грузом уменьшают его пробег от одной подзарядки до 2-х раз (до 80 км). Кроме того, в автомобильном

мире распространено мнение о том, что широкое внедрение электромобилей сдерживается дефицитом аккумуляторов для них (рис. 17) и их высокой ценой. Сейчас принято считать, что существенных недостатков у самого ТЭД для электромобиля нет. Но есть большие сложности в малогабаритных источниках его электропитания. Существующее на сегодня несовершенство таких источников тока не дает право на масштабное использование ТЭД в автомобилестроении [8].



Рис. 17. Аккумуляторный отсек французского опытного электромобиля типа "Renault Zoe" 2011 года выпуска [8]

В этой связи разработчиками электромобилей изучается возможность использования для них в качестве источников тока не аккумуляторов, а ионисторов (суперконденсаторов), имеющих очень малое время зарядки и высокую энергоэффективность (более 95 %) и большой рабочий ресурс циклов "зарядка-разрядка" (до нескольких сотен тысяч). Опытные образцы выпускаемых сейчас в мире ионисторов на графене (наноматериале 2-го рода [9]) имеют удельную энергоемкость до 32 Вт·ч/кг, сравнимую с таковой для свинцово-кислотных аккумуляторов (до 40 Вт·ч/кг) [8].

#### 4. ИЗОБРЕТЕНИЕ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

В истории техники изобретателем первого работоспособного **парохода** принято считать американского инженера Роберта Фултона (1765-1815 гг.), построившего в 1807 году пароход "Клермонт" (рис. 18) с ПД мощностью до 20 л.с. (до 14,7 кВт) [1, 10]. В 1809 году он запатентовал конструкцию своего корабля [10]. К 1840 году только в США по реке Миссисипи и другим водным просторам, включая Великие озера, курсировало до 1000 колесных пароходов [1].

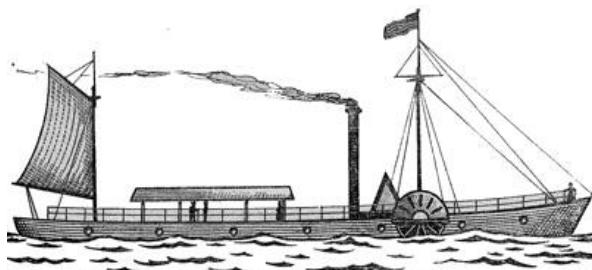


Рис. 18. Пароход "Клермонт" американского изобретателя Р. Фултона, открывший в 1807 году "машинную" эру в истории всемирного судоходства на водных просторах [10]

В России первый колесный пароход "Елизавета" (рис. 19) был построен в 1815 году владельцем механико-литейного завода в г. Санкт-Петербурге Карлом Бердом [10]. Двигался он со скоростью не более 5 узлов/ч (до 9,3 км/ч). Заметим, что первоначально в мире наибольшая скорость пароходов не превышала 7 узлов/ч (до 13 км/ч). К 1850 году в России было всего около 100 пароходов, плававших по рекам Нева, Волга, Днепр, Иртыш, Енисей, Лена и озеру Байкал [10].

Большим шагом в улучшении скоростных и грузоподъемных характеристик паровых судов во всем мире стала замена на них гребного колеса на гребной винт. Тем не менее, их низкие энергетические показатели требовали появления альтернативных кораблей.

Так на смену пароходу пришел **теплоход**, являющийся самоходным судном, основным двигателем которого является ДВС и чаще всего – дизельный [3]. ДВС теплохода может быть как малооборотным (в таком случае он работает непосредственно на гребной вал судна), так и высокооборотным. В последнем случае вал ДВС соединяется с гребным валом при помощи передачи, основными из которых являются механическая (редуктор), электрическая и гидравлическая.



Рис. 19. Первый российский колесный пароход "Елизавета", курсировавший на линии Петербург–Кронштадт [10]

В случае электрической передачи, дизель вращает ротор генератора постоянного или переменного тока, вырабатываемое которыми (этими типами электрогенераторов) электричество питает электродвигатели, приводящие в круговое движение гребной вал корабля. Электрическая передача позволяет плавно регулировать скорость вращения гребного винта судна. Теплоходы с электропередачей крутящего механического момента от ДВС на гребной вал корабля нередко выделяют в отдельный класс судов, называемый "дизель-электроходы" (рис. 20). Отметим, что пуск судовых дизелей на теплоходах производится при помощи сжатого воздуха. В настоящее время самым мощным в мире судовым дизелем является двигатель типа RTA96-C, выпускаемый финской фирмой "Вяртсиля" ("Wärtsilä"). Этот 14-ти цилиндровый двигатель развивает мощность в  $1,09 \cdot 10^5$  л.с. (до 80,1 МВт) [11]. Теплоходы разного тоннажа стали самым распространенным в мире типом надводных судов.



Рис. 20. Отечественный речной теплоход типа ПТ-150 [11]

На рис. 21 для сравнения с малотоннажным теплоходом, приведенным на рис. 20, показан внешний вид одного из крупнейших в мире на сегодня морских теплоходов *"Queen Mary 2"*, регулярно совершающего перевозки пассажиров между Европой и Америкой [11]. Двигатель на этом теплоходе – комбинированный и состоящий из 4-х дизелей и 2-х газовых турбин [3] суммарной мощностью  $157 \cdot 10^3$  л.с. (115,4 МВт). Интересным историческим фактом является то, что первые надводные дизельные суда в мире появились в

России в 1903 году благодаря техническим усилиям действующей на российском рынке фирмы "Товарищество нефтяного производства братьев Нобель" [11]. Кстати, управляющий этой фирмы приходился отцом выдающемуся шведскому изобретателю химических взрывчатых веществ Альфреду Нобелю [12].



Рис. 21. Английский пассажирский теплоход *"Queen Mary 2"*, являющийся одним из крупнейших в мире кораблей с ДВС по перевозке на морских и океанских просторах [11]

После успешных испытаний в России дизелей в качестве судовых машин их стали внедрять по всему миру на кораблях речного и морского назначения. В период 1911-1912 гг. на верфях Германии и Англии приступили к постройке нескольких крупных теплоходов. В 1912 году со стапелей в Дании сошел первый крупный товарно-пассажирский теплоход "Зеландия", имевший водоизмещение в 3200 т и грузоподъемность в 7400 т [11]. За его первым плаванием из датского г. Копенгагена в английский г. Лондон следил тогда весь мир. Успехи этого теплохода и достигнутая им серьезная экономия в расходе жидкого топлива по сравнению с пароходами того же класса и решило судьбу этого нового вида водного транспорта. По данным регистра Ллойда в 1930 году теплоходы составляли около 10 % мирового гражданского флота, а к 1974 году, по данным того же источника, они составляли уже до 89 % мирового гражданского флота [11].

Здесь следует указать и то, что достигнутые к середине 20-го столетия научно-технические успехи в области ядерной физики способствовали созданию новых более мощных надводных кораблей с силовыми ядерными энергетическими установками на борту. Первым среди них оказался советский атомный ледокол "Ленин", спущенный со стапелей на воду в 1957 году и совершивший большую многолетнюю работу при проводке по мощным ледовым полям грузовых судов в северных арктических широтах СССР [1]. Кроме того, упомянем здесь и о смелом замысле российских изобретателей от 1891 года, связанном с созданием судна на подводных крыльях [1]. Реализовать этот технический замысел удалось советским инженерам-конструкторам лишь во второй половине 20-го века (рис. 22). Теперь судна на подводных крыльях широко используются в мире для речных и морских пассажирских перевозок со скоростью до 50 км/ч [1].

В последние годы определенное распространение в мире получили суда на воздушной подушке. Прежде всего, это касается военной области их применения (рис. 23). В этом случае достаточно тяжелый корабль поднимается над поверхностью воды и суши за счет воздуха, нагнетаемого с избыточным давлением мощными вентиляторами под его плоское днище.

Интересно то, что подобная конструкция корабля (судна на воздушной подушке) была предложена еще в 1716 году шведским ученым Э. Сведенборгом [1].



Рис. 22. Внешний вид корабля на подводных крыльях [1]



Рис. 23. Внешний вид современного военного корабля на воздушной подушке, передвигающегося по воде и суше [1]

## 5. ИЗОБРЕТЕНИЕ ПОДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

Замечательным достижением человеческого разума стало создание **подводной лодки** (ПЛ). Техническая идея создания такого корабля восходит еще к великому ученому средневековья Леонардо да Винчи [13]. Реализовать эту идею удалось в 1776 году французскому изобретателю Бушнеллю, создавшему первую в мире ПЛ "Тартю" или "Черепаха" (рис. 24) [1].

Свою плавучесть эта ПЛ изменяла с помощью водного балласта, размещаемого, как и в современных ПЛ, в ее металлическом корпусе. Первая попытка боевого применения ПЛ относится к периоду гражданской войны за независимость США: именно тогда "Тартю" Бушнелла попыталась, хотя и безуспешно, атаковать у берегов Америки флагман британского флота [13]. Следующей попыткой создания подводного корабля с ПД была разработка от 1806 года ПЛ автором в будущем первого парохода – американского изобретателя Р. Фултона (рис. 25) [13].

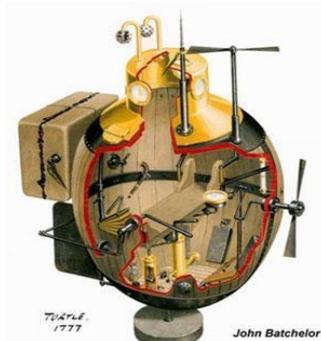


Рис. 24. Первая в мире подлодка "Тартю" французского изобретателя Бушнелла (1776 год создания в США) [13]

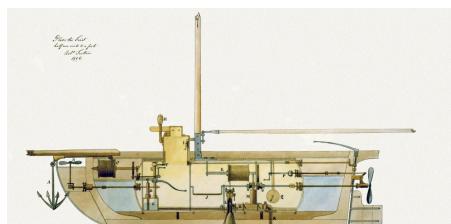


Рис. 25. Чертеж от 1806 года не реализованной в "металле" подводной лодки американского инженера Р. Фултона [13]

Обращение Р. Фултона к французскому императору Б. Наполеону с проектом постройки своей ПЛ согласно рис. 25 для проведения военных действий против английских надводных кораблей не увенчалось успехом. После же подписания мирного англо-французского договора, плена Б. Наполеона и его заточения на острове Эльба сам Р. Фултон отказался от участия в создании ПЛ для его освобождения [13].

В России первая ПЛ или субмарина инженера-конструктора Ивана Александровского была построена на Балтийском заводе в г. Санкт-Петербурге в 1866 году [13]. В 1878 году в г. Одессе была испытана первая ПЛ с педальным двигателем конструкции инженера С.К. Джевецкого (1843-1938 гг.) [1, 13]. Эта лодка была впервые оснащена перископом – прибором для наблюдения за водной поверхностью из подводного положения, мицами с резиновыми присосками к корпусу корабля противника и электророзапалом от тока гальванической батареи [1]. Любопытным историческим фактом является то, что после того, как во время катания царской четы на Серебряном озере Гатчины С.К. Джевецкий вынырнул со своей лодкой из воды и преподнёс российской императрице букет любимых ею орхидей, та приказала в течение 1880-1882 гг. построить по проекту инженера С.К. Джевецкого 50 шт. небольших подводных лодок, предназначавшихся для обороны морских крепостей [13]. В 1884 году на этой ПЛ был впервые установлен ТЭД [1]. В дальнейшем нашим соотечественником была предложена ПЛ, оснащенная двумя четырехтактными бензиновыми двигателями фирмы "Панар-Левассор" мощностью по 130 л.с. (95,5 кВт) каждый, работающими с помощью зубчатых передач на один гребной вал с четырехлопастным винтом. Заметим, что до 1906 года подводные лодки в российском флоте не выделялись в самостоятельный вид кораблей и числились миноносцами. Первая в мире ПЛ с судовым реверсным дизелем в качестве тяговой машины, способной работать в обоих направлениях кругового вращения вала, была построена в России в 1908 году для Балтийского флота по проекту инженера-конструктора Ивана Бубнова [1, 13]. Судовые быстроходные дизели на этой ПЛ "Минога" были трехцилиндровыми единичной мощностью 88,5 кВт при частоте их вращения 400 об/мин.

Первая мировая война (1914-1918 гг.) явилась важной причиной для развития подводного флота в противоборствующих державах. Именно в этот временной период появились ПЛ с дизельным двигателем для движения на поверхности моря и электрическим для движения под водой (рис. 26). К дизельному двигателю ПЛ подключали генератор, который производил электричество для подзарядки электрических батарей. Тогда субмарины и стали грозным оружием.



Рис. 26. Германская дизельная подводная лодка типа UC-1 периода Первой мировой войны в боевом походе [13]

Всего за время этой войны около 600 ПЛ воюющих государств потопили 55 крупных боевых кораблей (линкоров и крейсеров), 105 эсминцев и 33 субмарины [13]. Общая грузоподъемность потопленных на

море в это время торговых судов составила около 19 миллионов регистровых тонн. Действия германских подводных лодок на морских коммуникациях поставили Англию на грань поражения в данной войне. Так подводный флот и дизелестроение становятся важными факторами национальной безопасности промышленно развитых стран мира, а задача разработки судовых дизелей для подводных лодок превращается в приоритетную для всех ведущих морских держав.

К началу Второй мировой войны (1939-1945 гг.) в состав флотов ведущих морских держав входило следующее количество ПЛ: Германия – 57; СССР – 211; Италия – 105; Англия – 58; США – 99; Япония – 56 [13]. За время войны всеми ПЛ иностранных государств (кроме СССР) было потоплено 4330 транспортных судов общей грузоподъёмностью около 22,1 миллиона регистровых тонн, уничтожено 395 боевых кораблей, в том числе: 75 подводных лодок, 17 авианосцев, 3 линкора, 122 эсминца и 146 кораблей других типов [13]. Погибли экипажи 1123 подводных лодок [13]. Подводные лодки военно-морского флота бывшего СССР потопили 328 грузовых транспортов, 70 боевых кораблей и 14 вспомогательных судов противника общим водоизмещением 938 тысяч тонн [13]. Подлодки этого периода оставались в своём большинстве весьма технически несовершенными и были по сути "ныряющими". Они могли погружаться на глубину до 150 м и находиться под водой сравнительно небольшое время, измеряемое в часах и зависящее от степени заряда их аккумуляторных батарей и запаса кислорода на борту. Использование союзниками радиолокации для поиска ПЛ резко увеличило потери немецкого подводного флота. Следует отметить, что наибольших боевых успехов добились немецкие подлодки во время битвы за Атлантику в 1939-1941 гг. и особенно после того, как ведомство подводного флота рейха возглавил адмирал Карл Дёниц. Именно он разработал военную стратегию "волчьих стай" и впервые скординировал боевые действия нескольких десятков лодок в море (океане). Самой эффективной и массовой подлодкой Германии в эту войну была ПЛ серии VII (рис. 27). В конце Второй мировой войны немецкие инженеры-конструкторы вплотную подошли к техническому решению проблемы оснащения своих подводных лодок баллистическими ракетами [13].



Рис. 27. Германская дизельная подводная лодка типа U-47 (серия VIIIB) периода Второй мировой войны [13]

Противолодочные корабли (фрегаты и корветы) оснащены сонарами (гидролокаторами) для обнаружения погруженных лодок. Акустическое оборудование (гидрофоны) использовались на море со временем еще Первой мировой войны. К началу Второй мировой войны это оборудование значительно улучшилось и в нем стали использовать уже ультразвуковые волны вместо просто звуковых. Теперь прослушивались не производимые ПЛ подводные шумы, а отраженный ее корпусом пучок ультразвуковых волн. Как только с надводных кораблей или береговых станций наблюдения определяют местонахождение лодки противника при помощи указанного оборудования, ее заставляют покинуть запретную зону или уничтожают глубинными бомбами, сбрасываемыми с кормовых уста-

новок противолодочных кораблей бомбометами и установленными на взрыв на определенной глубине.

Современные подлодки используют в качестве источника энергии ядерные установки, дизельные моторы, аккумуляторы, двигатели Стирлинга и топливные элементы. В настоящее время подводные лодки находятся на вооружении 33 стран мира [13]. В конце 20-го века в состав флотов стран НАТО входило около 217 ПЛ (в том числе атомных с баллистическими ракетами – 23 и атомных с ядерными торпедами и крылатыми ракетами – 101) [13]. В России, с учётом ее оборонительной военной доктрины, прогнозируется иметь в строю до 100 шт. ПЛ различного класса и назначения [13]. На рис. 28 приведен внешний вид российской атомной ПЛ класса "Акула" [13].



Рис. 28. Российская атомная подводная лодка класса "Акула" во время надводного похода в открытом океане [13]

На рис. 29 представлен внешний вид американской атомной подводной лодки класса "Огайо" [13].

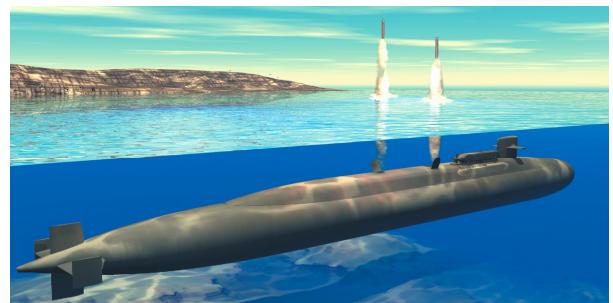


Рис. 29. Американская атомная подводная лодка класса "Огайо" в момент запуска из под воды своих баллистических ракет "Трайдент" с термоядерными боеголовками [13]

На рис. 30 показан общий вид дизельного отсека французской атомной ПЛ класса "Le Redoutable" [13].



Рис. 30. Дизельный отсек современной французской атомной подводной лодки класса "Le Redoutable" [13]

На рис. 31 проиллюстрирован торпедный отсек упомянутой нами выше французской атомной ПЛ класса "Le Redoutable" [13]. Рис. 32 дает нам общее представление о современной торпеде, движущейся под водой во время боевых стрельб по мишеням [13].



Рис. 31. Торпедный отсек современной французской атомной подводной лодки класса "Le Redoutable" [13]

В современной Германии производятся подводные лодки класса U-212 (рис. 33) с водородными топливными элементами, изготавливаемыми фирмой "Siemens AG" [13]. ПЛ класса U-212 стоят сейчас на вооружении Германии. Под водой данная лодка работает на водороде и практически не производит шумов. Отметим, что в США военные поставки топливных элементов типа SOFC для подводных лодок начались в 2006 году. В настоящее время американская компания "FuelCell Energy" разрабатывает топливные элементы мощностью 625 кВт для своих военных кораблей [13]. Укажем, что японская ПЛ "Urashima" с водородными топливными элементами типа PEMFC производства компании "Mitsubishi Heavy Industries" прошла ходовые испытания еще в 2003 году [13].



Рис. 32. Движущаяся на цель современная торпеда в ходе учебно-боевых подводных испытаний с участием ПЛ [13]

Отметим, что бывший СССР был единственной в мире военно-морской державой, серийно строившей подводные корабли проекта А615 с силовыми установками, базирующимиися на едином двигателе с химическим поглотителем [13]. Принцип работы такого двигателя ПЛ заключался согласно [13] в следующем. Выхлопные газы из дизеля поступали в газоохладитель, где они охлаждались и освобождались от водяных паров и частично от механических примесей. Далее они направлялись в специальные химические фильтры, где от них отделялся углекислый газ и окись углерода. Затем производилось дальнейшее освобождение выхлопных газов от избыточной влаги и их обогащение газифицированным кислородом. В результате в дизельный отсек ПЛ поступала смесь, близкая по своему составу к обычному воздуху [13].

Кроме того, перспективным направлением в создании для ПЛ нового типа двигателя стала разработка энергетической установки с электрохимическим генератором (ЭХГ) [13]. Интерес к ЭХГ в СССР "подогревался" тем обстоятельством, что в США в 1960-е годы бортовые системы пилотируемых космических кораблей "Джемини" (орбитальные полеты) и "Аполлон" (высадка на Луну) получали электропитание от топливных элементов.



Рис. 33. Современная германская подводная лодка класса U-212 с силовой энергоустановкой на водородных топливных элементах [13]

Следует напомнить читателю, что принцип работы энергетической установки с ЭХГ основан на открытом случайно еще 150 лет назад англичанином Уильямом Гровом эффекте: при электролизе две платиновые полоски, помещенные в водный раствор серной кислоты и обдуваемые одна кислородом, а другая водородом, дают электрический ток. В результате такой реакции в подобном топливном элементе, кроме электрического тока, образовывались еще тепло и вода. При этом энергетическое превращение происходит бесшумно, а единственным побочным продуктом указанной химической реакции является дистилированная вода, которой можно легко найти применение на подлодке или ином корабле. В 1989 году в СССР были закончены межведомственные испытания ПЛ проекта 613Э с опытной энергетической установкой на основе ЭХГ [13]. Тогда и был сделан вывод о том, что ЭХГ как неатомный экологически чистый малошумный источник электроэнергии с прямым преобразованием химической энергии в электрическую является перспективным для применения в подводном судостроении. В то же время, несмотря на очевидные преимущества энергоустановки на топливных элементах, специалистам-подводникам стало ясно, что она не обеспечивает требуемые оперативно-тактические характеристики подводной лодки океанского класса. Вот поэтому германские подводные лодки проекта U-212 (см. рис. 33) и оснащаются бортовой комбинированной двигательной установкой, в которой для движения на высоких скоростях под водой используются аккумуляторные батареи или топливные элементы, а для плавания в надводном положении – традиционный дизель-генератор [13].

## 6. ИЗОБРЕТЕНИЕ САМОЛЕТА И ВЕРТОЛЕТА

Первым аппаратом тяжелее воздуха, который 17 декабря 1903 года взлетел над землей и был способен на достаточно длительный полет, оказался американский *аэроплан* "Флайер-1" с бензиновым ДВС братьев Уилбера и Орвилла Райт (рис. 34) [14]. При этом максимальная скорость полета их аэроплана при встречном ветре составила до 43 км/ч. Мощность двигателя, основные части которого были изготовлены из алюминия, составляла 12,2 л.с. (9 кВт), а вес силового агрегата указанного аэроплана был равен 77 кг [14].



Рис. 34. Самолет "Флайер-1" братьев Райт с бензиновым ДВС, совершивший в 1903 году свой первый полет [14]

Весной 1906 года братья Райт запатентовали свое изобретение, технически проторившее путь к освоению человечеством воздушного пространства — стихии "AERO". В 1909 году французский авиатор Луи Блеро на *самолете* впервые перелетел через пролив Ла-Манш, а известный французский авиаконструктор и пилот Анри Фарман создал аэроплан "Фарман-3", ставший одним из первых в мире серийных поршневых самолетов и летающей "школой" для многих тысяч пилотов из разных стран [1]. Приведем ниже образное высказывание известного американского летчика Чарльза Линберга, впервые в мире пересекшего в 1928 году на самолете с поршневым ДВС Атлантический океан [14]: "*Моя посадка в Европе стала спичкой, которая запалила костер устремления людей в воздушное пространство*". Почти до начала Второй мировой войны в небе господствовали винтомоторные самолеты, построенные на основе авиационных поршневых двигателей, представляющих собой звездообразные четырехтактные ДВС, работающие на бензине. Максимальная скорость таких самолетов не превышала 850 км/ч [1]. К середине 1930-х годов авиаконструкторам становится ясно, что дальнейшее увеличение скорости полета самолетов за счет традиционных методов (возрастания мощности поршневых моторов и улучшения аэродинамических показателей планеров самолетов) является практически невозможным. Так, для увеличения скорости полета военного истребителя с 650 до 1000 км/ч (при скорости звука в воздухе при нормальных атмосферных условиях около 1195 км/ч [15]) необходимо было мощность поршневого мотора увеличивать в 6 раз! [16]. Для того, чтобы преодолеть указанный скоростной рубеж ученым и инженерам-авиаконструкторам необходимо было изобрести и создать принципиально новую конструкцию авиационного двигателя. Поэтому в мировом самолетостроении на смену поршневой авиации объективно приходит реактивная авиация, базирующаяся на турбореактивном двигателе (ТРД), принцип действия которого основан на преобразовании подводимой к нему энергии в кинетическую энергию истекающего из него рабочего тела (газа). Следует указать, что в мире реактивная авиация развивалась в соответствии с общими законами совершенствования техники — от простого к сложному, от опытных образцов к более совершенным летательным аппаратам (ЛА). Лучшие образцы реактивной техники появились в тех промышленно развитых странах мира, где традиции в области развития науки и техники были объективно сильны, а общий уровень их авиационной промышленности предшествующего периода с ДВС на борту ЛА был высок. Поэтому наибольших успехов в создании реактивной авиации добились ученые и авиаконструкторы Германии, США, Англии и СССР. В 1930 году английский изобретатель Фрэнк Уиттл получил патент №347206 на ТРД с воздушным компрессором, осевой турбиной, камерой сгорания и круглым соплом, реализованный в "металле" только в 1939 году [1, 16]. В 1935 году немецкий изобретатель Ганс фон Охайн получил патент №317/38 на разработанный им ТРД, установленный в 1939 году на истребитель "Хейнкель" типа He-178 (рис. 37) [1, 16].



Рис. 37. Первый в мире немецкий турбореактивный истребитель "Хейнкель" типа He-178 от 1939 года выпуска [16]

Турбореактивный самолёт "Хейнкель" типа He-178 превосходил по скорости (700 км/ч) все поршневые истребители своего времени, максимальная скорость которых не превышала 650 км/ч [17, 18]. Вместе с тем, он был менее экономичен в расходе топлива, имел малый радиус действия и ему требовалась более длинная взлётно-посадочная полоса с качественным твердым покрытием. Эти недостатки заметно сдерживали его боевое применение в полевых условиях.

К 1940 году немецкие учёные и авиаконструкторы фирмы "Юнкерс" создали ряд ТРД (например, типа Jumo-004A (рис. 38), BMW-003A и BMW-028) [17].

Поэтому не случайно первым в мире серийным турбореактивным самолетом стал военный немецкий истребитель "Мессершmitt" типа Me-262 (рис. 39).

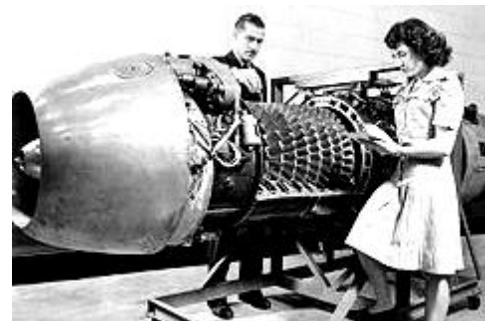


Рис. 38. Первый в мире немецкий серийный ТРД типа Jumo-004A, используемый вначале на военных истребителях [17]



Рис. 39. Первый немецкий серийный турбореактивный истребитель-бомбардировщик "Мессершmitt" типа Me-262, выпущенный в 1944–1945 гг. в количестве до 1300 шт. [1, 18]

Пионером создания ТРД в СССР является конструктор-турбинщик А.М. Люлька, который с 1937 года приступил к разработке своих первых авиационных реактивных двигателей [18]. После окончания Второй мировой войны советские авиаконструкторы получили возможность вплотную заняться созданием отечественной реактивной авиации. Правительством СССР в это тяжелое для нашей страны время было принято решение не о быстром копировании трофеевого немецкого самолета типа Me-262 (см. рис. 39), а о всенародном ускорении выпуска своих реактивных самолетов типа Як-15 (рис. 40) и МиГ-9 (рис. 41) и их показе на Тушинском воздушном авиапараде 1946 года.



Рис. 40. Один из первых советских турбореактивных самолетов типа Як-15, изготовленный в 1946 году [18]

Реактивный самолет Як-15 создавался в КБ им. Яковлева путем установки на хорошо известный нашим летчикам боевой истребитель Як-3 с поршневым мотором ТРД типа РД-10, разработанного в КБ им. Климова с учетом соответствующей адаптации трофейного немецкого двигателя типа Jumo-004 (см. рис. 38) [18]. Реактивный истребитель МиГ-9 был первым серийным турбореактивным самолетом, разработанным в знаменитом КБ им. Микояна. Он имел два размещенных рядом в нижней части своего фюзеляжа ТРД типа РД-20 с силовой тягой по 800 кг каждый и при взлетном весе в 5 т мог развивать максимальную скорость не менее 900 км/ч [18]. Советский истребитель МиГ-9 имел мощное вооружение на то время: одну пушку калибра 37 мм и две – калибра 23 мм.

24 апреля 1946 года реактивные самолеты Як-15 и МиГ-9 успешно совершили свои первые испытательные полеты и августе того же года оба первенца советской реактивной авиации участвовали в воздушном параде в Тушине [18].



Рис. 41. Один из первых советских турбореактивных самолетов типа МиГ-9, изготовленный в 1946 году [18]

На самолете звуковой барьер впервые в мире был преодолен американским пилотом Егером в 1947 году [18]. Весной 1947 года летчик-испытатель, генерал-майор П. Стефановский на реактивном самолете Як-15 впервые в СССР выполнил фигуры высшего пилотажа. Групповой пилотаж реактивных истребителей впервые был показан на пятерке Як-15 под командованием дважды Героя Советского Союза, генерал-лейтенанта Е. Савицкого (будущего маршала авиации) на военном параде в 1948 году [18]. Вслед за указанными реактивными самолетами в СССР появились разные модификации МиГов, освоившие как дозвуковые, так и сверхзвуковые скорости. Реактивных самолетов МиГ-15 было выпущено около 20 тыс. шт. Самым массовым в мире реактивным самолетом оказался советский МиГ-21 (крейсерская скорость – 2200 км/ч; наибольшая высота полета – 19 км; дальность полета – 1900 км) [18]. На смену МиГ-21 в СССР пришли МиГ-25 (крейсерская скорость – 3000 км/ч; наибольшая высота полета – 25 км; реактивный двигатель типа Р15-Б300 советского авиаконструктора Сергея Туманского), Су-9, Су-27 и СУ-31 для нейтрализации американских истребителей-перехватчиков IV-го поколения F-15 и F-16 [18]. Сейчас США разработали реактивный самолет V-го поколения F-22 (аналогов в мире пока нет).

Первым отечественным реактивным пассажирским авиалайнером был Ту-104 (1955 год), оборудованный двумя турбореактивными двигателями типа РД-3М-500 (или АМ-3М-500), разработанными в КБ им. Микулина [19]. Технической "вершиной" в реактивном пассажирском самолетостроении стал созданный в 70-е годы 20-го века англо-французский сверхзвуковой самолет "Конкорд" (рис. 42), пересекавший Атлантический океан примерно за три часа [1]. В 2003 году данный тип самолета в последний раз приземлился в Лондонском аэропорту, перевозив за время своих полетов по всему миру около 2 млн. пассажиров. Хочется надеяться, что в ближайшем будущем в мире на смену этому сверхскоростному самолету придет новое поколение пассажирских авиалайнеров.

На рис. 43 приведен самый быстрый на сегодня в мире реактивный самолет – летающий американский военный разведчик "Локхид" типа SR-71 ("Черный дрозд"), развивающий с помощью двух мощных ТРД максимальную скорость полета до 3911 км/ч [1].

Несмотря на более низкие скорости полета, сейчас в мировой гражданской и военной авиации активно применяются самолеты, использующие винтовые двигатели той или иной конструкции (рис. 44) [19]. Заметим, что винтовентиляторный двигатель типа Д-27 (разработка Запорожского машиностроительного КБ "Прогресс" им. академика А.Г. Ивченко, Украина) в настоящее время используется на винтомоторных самолётах Як-44 (производство России) при их крейсерской скорости полёта в 670 км/ч и на Ан-70 (производство Украины), летающем в воздушной стихии AERO с крейсерской скоростью в 750 км/ч [19].



Рис. 42. Англо-французский сверхзвуковой пассажирский самолет "Конкорд" 1970-х годов разработки и выпуска [1]



Рис. 43. Современный американский сверхскоростной военный реактивный самолет "Локхид" типа SR-71 [1]



Рис. 44. Современный российский многолопастный самолет ЯК-44 с винтовентиляторными двигателями типа Д-27 [19]

Укажем, что более сложным делом, чем создание самолета, в мировой авиации было изобретение и разработка **вертолета**. Впервые такая летающая машина с 4-мя винтами была сконструирована в 1907 году французскими авианиженерами Бреге и Рише [1]. Больших успехов в этом авиастроительном деле смог достичь выдающийся авиаконструктор Игорь Сикорский, иммигрировавший в США и создавший там в 1939 году работоспособный вертолет с одним винтом [1]. После окончания Второй мировой войны вертолеты стали активно применяться как летающее транспортное средство, перевозящее грузы и пассажиров в труднодоступные районы, по всему миру. В 1951 году выдающимся советским авиаконструктором М.Л. Милем был создан первый отечественный вертолет типа Ми-1 (рис. 45) [1]. Эта машина была способна практически вертикально садиться и взлетать с суши.



Рис. 45. Первый советский вертолет типа Ми-1 [1]

Далее в известном на весь мир КБ им. Миля последовали новые разработки более надежных, мощных и скоростных представителей этого семейства гражданских и военных вертолетов – Ми-2, Ми-4, Ми-6, Ми-8 (рис. 46), Ми-24 и Ми-26, которые и поныне являются некоторыми из лучших в своем классе ЛА.



Рис. 46. Советский турбовинтовой вертолет типа Ми-8 [1]

Последними серийными разработками военных всепогодных вертолетов в мире являются российский бронированный Ка-50 (КБ им. Камова, авиаконструктор Сергей Михеев) и американский "Апачи" [18, 19].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скляренко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Харьков: Веста, 2009. – 144 с.
2. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
3. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 14: Изобретение двигателей // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №3. – С. 3-15.
4. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Паровоз>.
5. <http://zdt-magazine.ru/publik/history/2009/12-09.htm>.
6. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Электровоз>.
7. [http://1interesnoe.info/2011/01/energeticheskie\\_ustanovki](http://1interesnoe.info/2011/01/energeticheskie_ustanovki).
8. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Электромобиль>.
9. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Харьков: Изд-во "НТМТ", 2011. – 311 с.
10. [http://itishistory.ru/1k/3\\_korabli\\_2.php](http://itishistory.ru/1k/3_korabli_2.php).
11. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Теплоход>.
12. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 4: Изобретение химических взрывчатых веществ // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 3-9.
13. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Подводная\\_лодка](http://ru.wikipedia.org/wiki/Подводная_лодка).
14. <http://www.engine-market.ua/page/history>.
15. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
16. <http://wunderwaffe.narod.ru/Magazine/AirWar/29/03.htm>.
17. [http://www.avsim.su/wiki/Авиационные\\_двигатели](http://www.avsim.su/wiki/Авиационные_двигатели).
18. <http://vakul.ru/istoriya-aviacii/nachalo-reaktivnogo-veka>.
19. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Воздушно-реактивный\\_двигатель](http://ru.wikipedia.org/wiki/Воздушно-реактивный_двигатель).

**Bibliography (transliterated):** 1. Sklyarenko V.M., Syadro V.V. Ot-krytiya i izobreteniya. – Har'kov: Vesta, 2009. – 144 s. 2. Bol'shoj illyustrirovannyj slovar' inostrannyyh slov. - M.: Russkie slovari, 2004. - 957 s. 3. Baranov M.I. Antologija vydayuschihsya dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 14: Izobretenie dvigatelej // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2013. – №3. – S. 3-15. 4. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Parovoz>. 5. <http://zdt-magazine.ru/publik/history/2009/12-09.htm>. 6. [http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%3B%D0%BE%D0%BC](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BC). 7. [http://1interesnoe.info/2011/01/energeticheskie\\_ustanovki](http://1interesnoe.info/2011/01/energeticheskie_ustanovki). 8. <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%3B%D0%BE%D0%BC>. 9. Baranov M.I. Antologija vydayuschihsya dostizhenij v nauke i tehnike: Monografiya v 2-h tomah. Tom 1. – Har'kov: Izd-vo "NTMT", 2011. – 311 s. 10. [http://itishistory.ru/1k/3\\_korabli\\_2.php](http://itishistory.ru/1k/3_korabli_2.php). 11. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Teploход>. 12. Baranov M.I. Antologija vydayuschihsya dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 4: Izobretenie himicheskikh vzryvchatyh veschestv // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2011. – № 5. – S. 3-9. 13. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Подводная\\_лодка](http://ru.wikipedia.org/wiki/Подводная_лодка). 14. <http://www.engine-market.ua/page/history>. 15. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 16. <http://wunderwaffe.narod.ru/Magazine/AirWar/29/03.htm>. 17. [http://www.avsim.su/wiki/Aviacionnye\\_dvigateli](http://www.avsim.su/wiki/Aviacionnye_dvigateli). 18. <http://vakul.ru/istoriya-aviacii/nachalo-reaktivnogo-veka>. 19. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Vozdushno-reaktivnyj\\_dvigatel](http://ru.wikipedia.org/wiki/Vozdushno-reaktivnyj_dvigatel).

Поступила 11.05.2012

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.  
НИПКИ "Молния"

Национального технического университета  
"Харьковский политехнический институт".  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47  
тел. (057) 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I.

An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 15: Invention of transport.

A brief scientific essay on the history of invention of the main transportation means utilizing power of various-kind engines is presented.

**Key words – history, invention of transport.**

Г.В. Безпрозваних, А.М. Бойко

## ЕЛЕКТРОСТАТИЧНІ ПРОЦЕСИ В СИЛОВИХ КАБЕЛЯХ

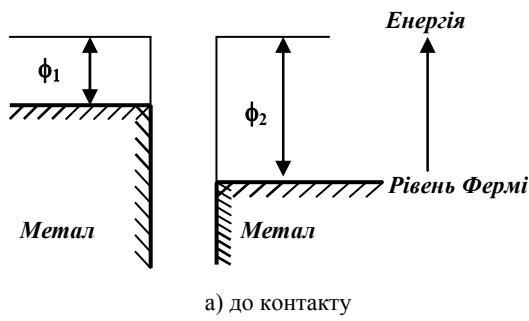
**Виконано спостереження контактної електризації зразків силових кабелів. Встановлено, що контактна різниця потенціалів, що утворилася при розділені вільних зарядів на поверхнях контактуючих матеріалів, залежить від конструкції кабелів, застосованих матеріалів та схеми обстеження. Представлено часові ряди дрейфу емності та тангенсу кута діелектричних втрат, який обумовлено нестабільністю процесу трибоелектричного заряджання поверхонь, які контактирують.**

**Выполнено наблюдение контактной электризации образцов силовых кабелей. Установлено, что контактная разность потенциалов и емкость, образованная при разделении свободных зарядов на поверхностях контактирующих материалов, зависит от конструкции кабелей, применяемых материалов и схемы обследования. Представлены временные ряды дрейфа емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, обусловленного нестабильностью процесса трибоэлектрической зарядки контактирующих поверхностей.**

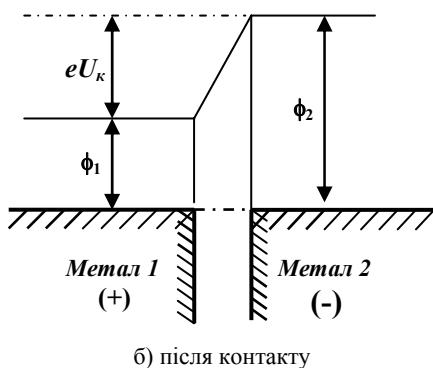
### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ

Статична електрика представляє сукупність явищ, що пов'язані з виникненням, збереженням та релаксацією вільного електричного заряду (електронів, іонів на поверхні або в об'ємі діелектричних матеріалів, на ізольованих провідниках, між провідником та ізоляцією).

При контакті двох матеріалів з різними властивостями електричний заряд переходить з одного матеріалу на інший. Це явище відомо як контактна електризація або контактне заряджання. При постійному терпі матеріалів це явище називається як трибоелектризація, трибоелектричне заряджання або просто трибозаряджання [1-4]. Перенос електричних зарядів обумовлено контактною різницею потенціалів внаслідок різної роботи виходу, наприклад, електронів  $\phi_1$  та  $\phi_2$  (при контакті двох металів, рис.1) або ефективній роботі виходу (при контакті металу та діелектрика або двох діелектриків, рис.2):

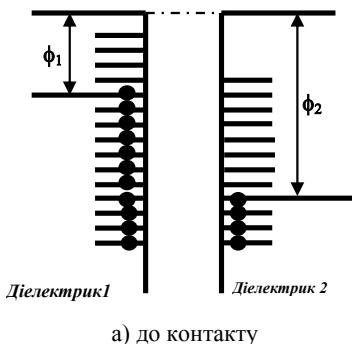


а) до контакту

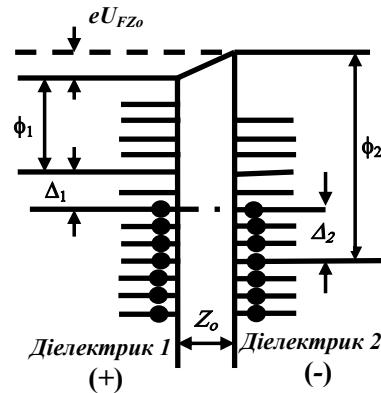


б) після контакту

Рис. 1



а) до контакту



б) після контакту  
Рис. 2

При молекулярно-іонній моделі контакту металу – діелектрик вільний електрон інжектується в поверхню акцептора діелектрика [1].

Контактна різниця потенціалів  $U_k$  для металів визначається як:

$$U_k = \frac{\phi_1 - \phi_2}{e}, \quad (1)$$

де  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд електрона.

При kontaktі двох діелектриків можливі енергетичні рівні для електронів розташовуються на поверхні, яка називається поверхнею стану [1]. Переход електронів з заповненої поверхні стану діелектрика 1 на незаповнену поверхню стану діелектрика 2 (рис. 2,а) відбувається за рахунок різниці ефективних робіт виходу двох поверхонь. Переїзд заряду можливий

© Г.В. Безпрозваних, А.М. Бойко

тільки в тому випадку, коли рівні Фермі співпадають (див. рис. 2,а та рис. 2,б). При цьому енергія Фермі діелектрика 1 та 2 змінюється на  $\Delta_1$  та  $\Delta_2$  відповідно. Переніс заряду призводить до появи різниці потенціалів  $U_{FZ_o}$  між поверхнями:

$$U_{FZ_o} = \frac{(\phi_2 - \Delta_2) - (\phi_1 + \Delta_1)}{e}. \quad (2)$$

Заряд, що переноситься, при контакті як двох металів, так і діелектриків, визначається контактною різницею потенціалів, та ємністю, яка утворилася при розділені зарядів на поверхнях контактуючих металів (металу та діелектрика, діелектриків).

В табл. 1 наведено амплітудні значення щільності заряду після контакту полімерних матеріалів з металом в залежності від умов контакту.

Таблиця 1

Полімерний матеріал	Щільність заряду, пКл/см <sup>2</sup>	Умови контакту
Поліетилен	500	Повітря, контакт
	5000	Повітря, тертя
	10000	Вакуум, тертя
Політетрафторетилен	3000	Вакуум
	7000	Повітря, контакт
	20000	Вакуум, тертя
	200000	Вакуум, обертання
Нейлон	100000	Вакуум, контакт
	100000	Вакуум, обертання
Поліімід	300000	Вакуум, обертання
Полікарбонат	100000	Вакуум, обертання

Контактна електризація є причиною виникнення значних потенціалів та термоелектронних струмів, значення яких залежать від діелектричних властивостей матеріалів, значення їх взаємного тиску при стиканні, вологості та температури поверхонь. Так, в залежності від типу полімеру при kontaktі та терти метал-полімер, полімер-полімер виникають потенціали до декількох тисяч вольт, що може привести до електростатичного пробою (ESD) [3].

За рахунок перерозподілу електронів на поверхнях контактуючих матеріалів виникає подвійний електричний прошарок з протилежними знаками електричних зарядів (див. рис. 1,б та 2,б) – електрична ємність, яка суттєво залежить від типу матеріалів.

Схематично процес контакту двох матеріалів з релаксацією заряду представлено на рис. 3: позиція а – до контакту; б – контакт та переніс заряду; в – розділення контактуючих матеріалів; г – релаксація зарядів.

#### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

В електроізоляційних конструкціях, зокрема, в силових кабелях, між струмопровідними жилами та ізоляцією, ізоляцією та металевими екранами спостерігається постійний контакт (позиція "б" на рис. 3). Можливість накопичення заряду статичної електрики визначається як інтенсивністю виникнення, так і умовами стикання зарядів. Інтенсивність виникнення зарядів визначається фізико-хімічними властивостями матеріалів та технологічного обладнання, які застосовуються при виготовленні кабелів, а також парамет-

рами технологічних процесів. Стікання зарядів може частково відбуватися в разі заземлення металевих екранів кабелю [5], а на інших контактуючих поверхнях відбувається переніс зарядів, що призводить до виникнення контактної різниці потенціалів, побічної ємності та додаткових втрат на електропровідність, що є джерелом старіння полімерної ізоляції.

*Цілюм статті є спостереження за електростатичними процесами в зразках силових кабелів різної конструкції та з різними матеріалами, які призводять до виникнення контактної різниці потенціалів, флюктуацій ємності та тангенсу кута діелектричних втрат в часі.*

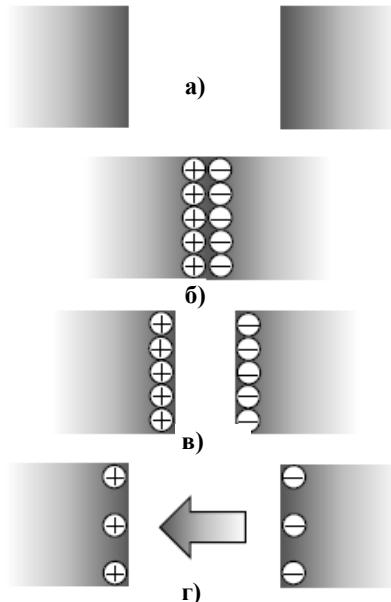


Рис. 3

#### МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вимірювання контактної різниці потенціалів ( $U_k$ ) зразків силових кабелів виконано цифровим мультиметром APPA 106, електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат на частоті 120 Гц та 1 кГц - цифровим вимірювачем Е7-22.

Нижче наведено результати обстежень чотирьох зразків силових кабелів практично однакової довжини (1,2-1,3 метра).

1. Кабель ЦААБНлГ-3×150-6 кВ трохжильний з паперово-просоченою ізоляцією, алюмінієвими жилами перерізом 150 мм<sup>2</sup> на напругу 6 кВ.

В такому кабелі кожна струмопровідна жила має фазну ізоляцію на основі кабельного паперу. Поверх фазної на всі три ізольовані жили накладається шляхом обмотки поясна ізоляція також з кабельного паперу. В процесі експлуатації властивості фазної та поясної ізоляції – різні, між ними – прошарки просочення. Цілком ймовірно, що при kontaktі фазної та поясної ізоляції буде виникати різниця потенціалів.

На рис. 4 наведено залежності контактної різниці потенціалів від часу спостереження для двох схем обстеження: а) одна фаза відносно металевої алюмінієвої оболонки; б) три фази разом відносно металевої алюмінієвої оболонки.

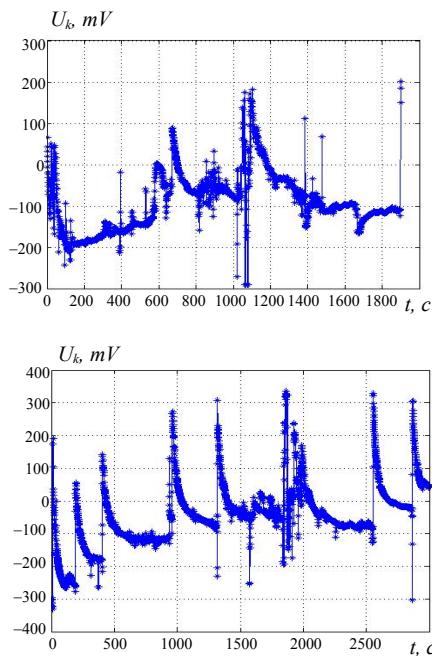


Рис. 4

Для останньої схеми обстеження контактна різниця потенціалів більше, що обумовлено наявністю більших контактуючих поверхонь, зокрема, трьома фазними з відповідними частинами поясної ізоляції.

2. Кабель АВВГ-4×120 чотирьохжильний з алюмінієвими жилами перерізом  $120 \text{ mm}^2$  з полівінілхлоридною (ПВХ) ізоляцією та захисною оболонкою на основі ПВХ пластикуту без металевих оболонок на напругу 1 кВ.

Між порядом розташованими ізольованими жилами є повітряний зазор. Властивості двох діелектриків – ПВХ пластикуту та повітря – різні, що обумовлює появу потенціалу та додаткової ємності.

На рис. 5 наведено зміни в часі контактної різниці потенціалів для двох фаз, що безпосередньо знаходяться в контакті (крива 1), та не контактуючих (крива 2).

Часові залежності ємності контактуючих фаз та тангенсу кута діелектричних втрат для частоти 1 кГц показано на рис. 6 та рис. 7 відповідно. Під час проведення вимірювань на 500 секунді на кабель діяла механічна сила, що призвело до короткочасного розділення контакту та релаксації зарядів (див. рис. 3,в,г). Відповідно до цього відбулося зменшення ємності (рис. 6, стрибок вниз на залежності) та зростанню тангенсу кута діелектричних втрат (рис. 7, стрибок вверх). Зростання тангенсу кута діелектричних втрат в цей час обумовлено наявністю вільних не скомпенсованих зарядів, – втратами на електропровідність:

$$\varepsilon^* = \varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega} = \varepsilon + \frac{1}{j\omega\rho_v}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon^*$  – комплексна діелектрична проникність; яка складається з дійсної частини  $\varepsilon$  – відносної діелектричної проникності та уявної, що характеризує втрати в ізоляції на круговій частоті  $\omega$ ;  $\sigma$  – провідність та  $\rho_v$  – питомий об'ємний опір ізоляції.

Відновлення ємності до початкових значень відбулося за 4 секунди, що пов'язано з малою сталою т

саморозряду ПВХ пластикуту: від 5 до 50 с в залежності від складу. Для поліетилену стала саморозряду дорівнює 18000 с [4].

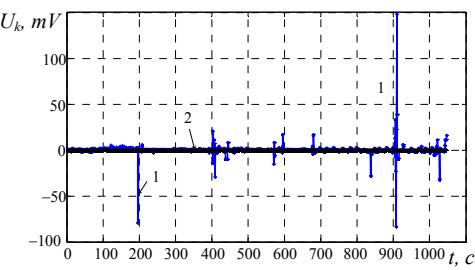


Рис. 5

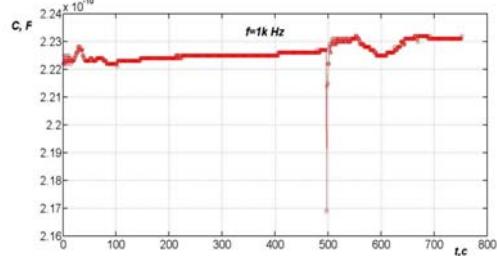


Рис. 6

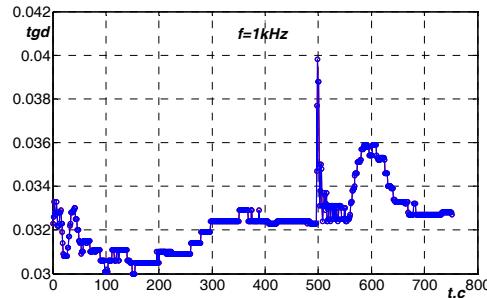


Рис. 7

3. Кабель ПвБВнг-3×35+1×16-1 кВ зі зшитою поліетиленовою ізоляцією, ПВХ проміжною оболонкою та зі сталевою бронею (рис. 8) на напругу 1 кВ. Три жили – перерізом  $35 \text{ mm}^2$ , одна –  $16 \text{ mm}^2$ .

Для поруч розташованих ізольованих жил однакового перерізу  $35 \text{ mm}^2$  контактна різниця потенціалів дорівнює  $-350 \text{ mV}$ , причому має практично одинакові значення на всьому періоді спостереження (рис. 9,а). Для віддалених жил однакового перерізу – зменшується від  $+350 \text{ mV}$  до 0, переходить в область від'ємних значень до  $-150 \text{ mV}$  і поступово наближається до 0 за той же час спостереження, що і для поруч розташованих жил.

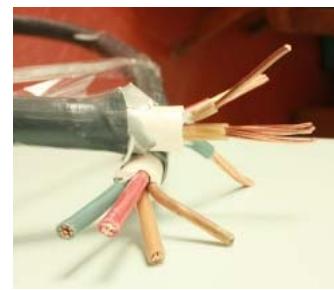
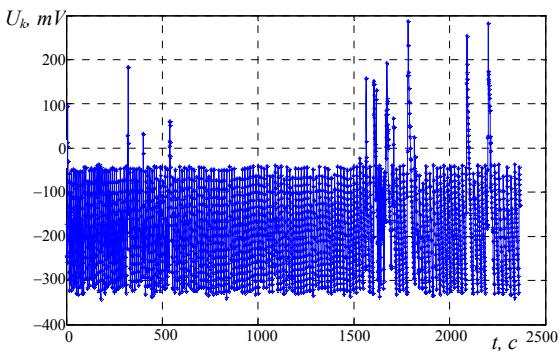
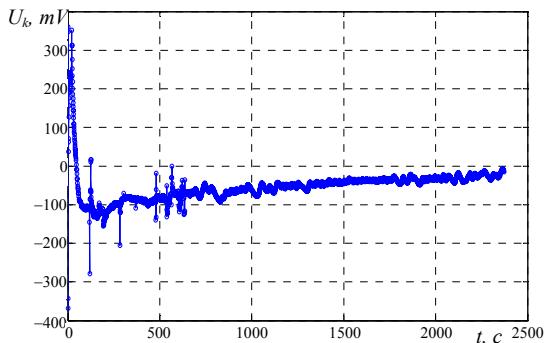


Рис. 8



а



б

Рис. 9

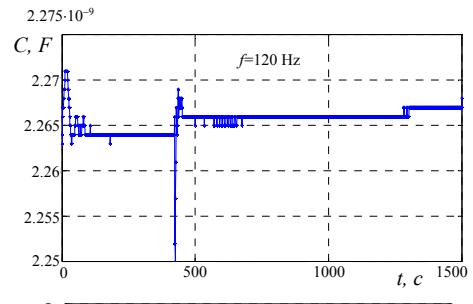
Для віддалених жил в кабелі з поліетиленовою ізоляцією на протязі 40 хвилин спостерігається контактна різниця потенціалів на відміну від кабелю з ПВХ ізоляцією (порівняйте рис. 5, крива 2 та рис. 9, б). Це обумовлено високими електрофізичними властивостями поліетиленової ізоляції. Відповідно з цим характер зміни ємності та тангенсу кута діелектричних втрат для зшитої поліетиленової ізоляції при дії механічної завади (натискання на кабель) – одинаковий (стрибки на рис. 10, а, б – для частоти 120 Гц; в, г – для частоти 1 кГц). Висока щільність поверхневих пасток поліетилену ( $10^{14}$  еВ<sup>-1</sup> м<sup>-2</sup>) [4] призводить до того, що зі зменшенням ємності тангенс кута діелектричних втрат також зменшується (на відміну від характеру зміни для ПВХ пластикуту – рис. 6, 7).

4. Одножильний кабель ПвБВнг-1×240-6 кВ (рис. 11) з мідною жилою перерізом 240 мм<sup>2</sup>, зі зшитою поліетиленовою ізоляцією, напівпровідниковими екраними по жилі та ізоляції, мідним екраном, проміжною ПВХ оболонкою та мідною бронею на напругу 6 кВ.

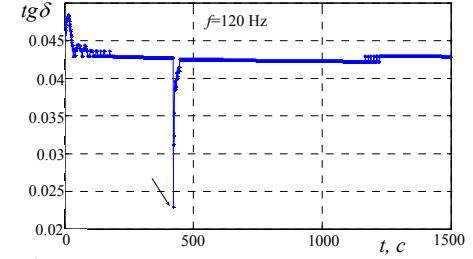
Наявність напівпровідників екранів не привела до суттєвого зменшення контактної різниці потенціалів (рис. 12).

Введення в поліетилен сажі призводить до зменшення питомого об'ємного опору, при чому значення такої напівпровідникової композиції не повинно перевищувати  $10^5$  Ом·м [6]. При значеннях  $\rho_v \leq 10^5$  Ом·м контактна електризація не виникає [4]. Кабелі зі зшитою поліетиленовою ізоляцією з напівпровідниковими екранами напругою 20 кВ мають такі ж значення контактної різниці потенціалів  $U_k$  та характер зміни в часі [7].

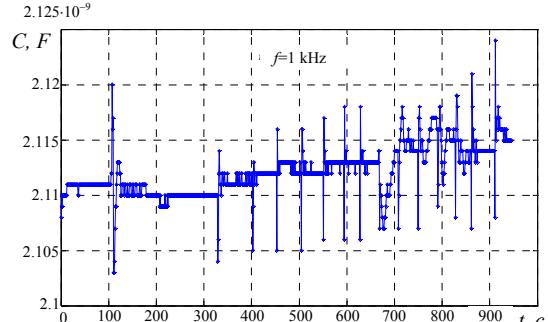
Для проміжної ПВХ оболонки контактна різниця потенціалів не перевищує 15 мВ (абсолютне значення) (рис. 13).



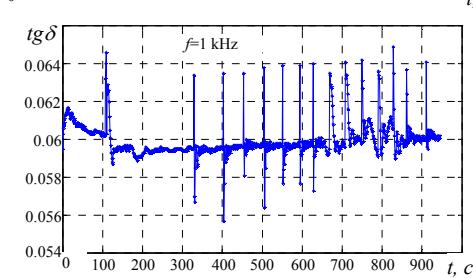
а



б



в



г

Рис. 10



Рис. 11

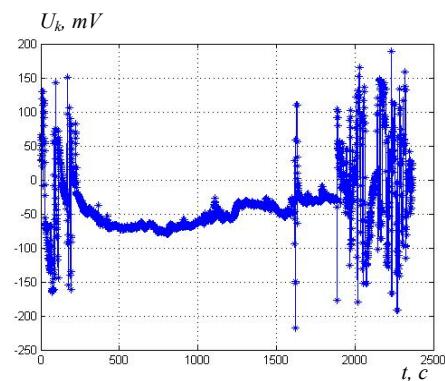


Рис. 12

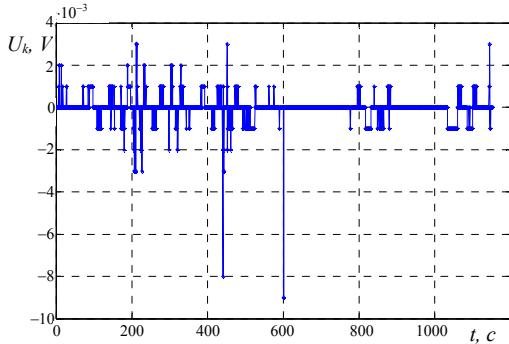


Рис. 13

### ВИСНОВОК

Електростатичні процеси, пов'язані з контактною електризацією матеріалів конструктивних елементів силових кабелів, призводять до появи контактної різниці потенціалів, додаткової ємності та діелектричних втрат на електропровідність.

Експериментально показано, що контактна різниця потенціалів суттєво залежить від діелектричних матеріалів та схеми обстеження силових кабелів.

Встановлено характер зміни ємності та тангенсу кута діелектричних втрат для ізоляції на основі ПВХ пластикуту та зшитої поліетиленової.

Наявність в конструкції кабелів зі зшитою ізоляцією напівпровідниківих екранів по жилі та ізоляції не призводить до зменшення контактної різниці потенціалів в порівнянні з кабелями без таких екранів, що пов'язано, очевидно, з властивостями наночасток сажі в кабельній композиції.

Під дією контактної електризації в силових кабелях з паперово-просоченою та зшитою поліетиленовою ізоляцією має місце повільний постійний процес її старіння, навіть при відключені від навантаження.

При діагностичних обстеженнях силових кабелів за діелектричною абсорбцією необхідно забезпечити умови вимірювання ємності та тангенсу кута діелектричних втрат без впливу механічних завад на кабель. Інакше можливо отримати підвищенні значення тангенсу кута діелектричних втрат для ПВХ ізоляції та зменшенні – для поліетиленової. Так, для обстежених кабелів спостерігається: для ПВХ ізоляції – збільшення  $\tan \delta$  на 30 %, для поліетиленової ізоляції – зменшення  $\tan \delta$  на частоті 120 Гц – в 2 рази.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Castle P.G. Contact charging between insulators / P.G. Castle // Journal of Electrostatics, 1997. – № 40-41, pp. 13-20.
- Bailey A.G. The charging of insulator surface / A.G. Bailey // Journal of Electrostatics, 2001. – № 51/52, pp. 82-90.
- Kwetkus B.A. Gas breakdown in contact electrification/ B.A. Kwetkus, K. Satller, H.C. Siegmann // Journal Physics Dielectric: Applied Physics, 1992. – № 25. - 139 p.
- Besprozvannyh A.V. Termo-tribo-`elektricheskij potencial dlya ocenki stareniya polimernoj izolyacii / A.V. Besprozvannyh // Vestnik NTU "HPI". - 2009. - № 27. - S. 16-24.
- Bezprozvannih G.V. Eksperimental'ne viznachennya triboelektrichnogo potencialu v neekranovanih ta ekranovanih kablyah / G.V. Bezprozvannih, A.M. Bojko // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2012. - № 3. - S. 56-60.
- Besprozvannyh A.V. Obosnovanie `elektrofizicheskikh harakteristik poluprovodnyaschih `ekranov silovoy napryazheniya so sshitoj izolyacijei / A.V. Besprozvannyh, B.G. Naboka, E.S. Moskvitin // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2010. – № 3. - S. 42-45.
- Bezprozvannih G.V. Bojko A.M. Triboelektrichnij efekt v elektroizolyacijsnih konstrukciyah / G.V. Bezprozvannih, A.M. Bojko // Tezi dopovidej HH mizhnarodno-praktichnoi konferencii, ch. II (15-17 travnya 2012 r., Harkiv, NTU "HPI". - 324 s.

Надійшла 25.05.2013

*Безпрозваних Ганна Вікторівна, д.т.н., проф.,*

*Бойко Антон Миколайович*

*Національний технічний університет*

*"Харківський політехнічний інститут"*

*кафедра електроізоляційної та кабельної техніки*

*61002, Харків, вул. Фрунзе, 21*

*тел. (057) 707-60-10, e-mail: bezprozvannych@kpi.kharkov.ua*

*Besprozvannych G.V., Boyko A.M.*

**Electrostatic processes in power cables.**

Observation of contact electrification of power cable samples is made. It is revealed that the contact potential difference and the capacity formed under separation of free charges on the surfaces of the contacting materials depend on cable design, applied materials, and inspection schemes. Time series of capacity drift and dielectric loss tangent caused by instability of triboelectric charging of the contacting surfaces are presented.

**Key words – contact electrification, triboelectric charging, contact potential difference, capacity drift, dielectric loss tangent.**

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ СТАРЕНИЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

*Встановлено кореляційний зв'язок між параметрами, що характеризують механічне та теплове старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги. На основі лінійного та експоненціального регресійного аналізу при довірчій вірогідності 0,95 встановлено критичні значення тангенсу кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції, що відповідають вичерпанню ресурсу кабелів.*

*Установлена корреляционная связь между параметрами, характеризующими механическое и тепловое старение бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей среднего напряжения. На основании линейного и экспоненциального регрессионного анализа при доверительной вероятности 0,95 установлены критические значения тангенса угла диэлектрических потерь фазной и поясной изоляции, соответствующие исчерпанию ресурса кабелей.*

### ВВЕДЕНИЕ

Нормальная работа систем электроснабжения энергоблоков АЭС, промышленных предприятий, транспорта, сельского, коммунального и других отраслей хозяйства невозможна без надежной работы силовых кабелей низкого и среднего класса напряжения. При этом кабели с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) напряжением 6-10 кВ являются основными в сетях "чистых" зон энергоблоков АЭС, в городских и областных кабельных сетях. Доля таких кабелей в сетях составляет свыше 99 %. Физический износ силовых кабелей городских и областных кабельных сетей находится на уровне 70-80 % [1-5]. Удельная повреждаемость кабельных линий (КЛ) в среднем составляет от 4,5 до 7 случаев на 100 км/год (рис. 1) [5]. Кабельные линии всех классов напряжения повреждаются из-за дефектов прокладки (до 20 %), старения изоляции силовых кабелей (31 %), механических повреждений (30%), заводских дефектов (10 %) и коррозии (9 %) [5].

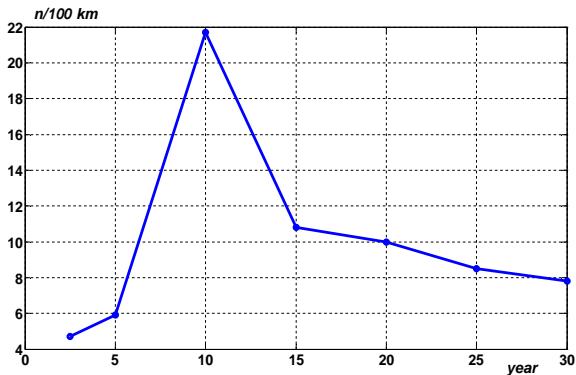


Рис. 1

Для повышения надежности работы силовых кабелей и кабельных линий применяется система планово-профилактических испытаний.

Техническое состояние изоляции кабелей определяют путем подачи постоянного испытательного напряжения, превышающего номинальное в 6 раз.

Испытание кабелей повышенным постоянным испытательным напряжением не позволяет получить достоверную информацию о реальном техническом состоянии силовых кабелей, а для длительно эксплуатирующихся силовых кабелей часто заканчивается

пробоем изоляции. Поэтому такие испытания классифицируют как испытания, разрушающие изоляцию кабелей. Испытания повышенным постоянным напряжением целесообразно проводить при вводе новых кабельных линий в эксплуатацию, после ремонта эксплуатирующихся кабельных линий, а также при отсутствии возможности применения для оценки старения бумажно-пропитанной изоляции методов неразрушающего контроля. В остальных случаях техническое состояние изоляции силовых кабелей следует оценивать на основе применения неразрушающих методов контроля.

Достоверная диагностика состояния бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей неразрушающими методами позволяет отказаться от профилактических испытаний изоляции разрушающими методами контроля, которые во многих случаях приводят к уменьшению ресурса, несвоевременному и непредсказуемому пробою изоляции.

Важным вопросом является также оценка результатов контроля и формулирование заключения о возможности эксплуатации кабелей. Для этого необходимо иметь критерии оценки по контролируемым параметрам, которые позволяют оценить степень старения бумажно-пропитанной изоляции и прогнозировать остаточный ресурс силовых кабелей.

Силовые кабели имеют два вида изоляции – фазную (вокруг каждой жилы по отдельности) и поясную (вокруг трех жил вместе). Изоляция выполняется путем обмотки жил лентами кабельной бумаги. В исходном состоянии свойства фазной и поясной изоляции должны быть идентичными. В процессе старения кабелей появляются различия, вызванные деструкцией целлюлозы и миграцией низкомолекулярных полярных продуктов ее разложения в более холодную часть кабеля – к оболочке, в поясную изоляцию. В результате свойства поясной изоляции со временем ухудшаются в большей степени по сравнению с фазной. Уменьшается механическая прочность кабельных бумаг, растет тангенс угла диэлектрических потерь [6-11].

Особенностью силовых кабелей среднего напряжения является то, что для них характерно тепловое старение бумажно-пропитанной изоляции в процессе эксплуатации. Толщина изоляции выбирается из условий обеспечения механической прочности. Так

как температурные коэффициенты линейного расширения кабельной бумаги – природного полимера и токопроводящих жил, металлических оболочек кабеля – разные, то при изменениях температуры меняются термомеханические напряжения в диэлектрике. Длительное действие термомеханических напряжений в условиях одновременного действия тепловых и электрических полей ведет к образованию микродефектов в твердой изоляции, уменьшению энергии активации процесса деструкции, снижению механической прочности, т.е. механическому старению. Старение диэлектрика под действием внутренних термомеханических напряжений и внешних механических воздействий описывается формулой Журкова [7]:

$$\tau_m = A \cdot e^{\frac{W - \gamma\sigma}{kT}}.$$

Формула Журкова имеет такой же вид, как и формула Аррениуса

$$\tau_T = A \cdot e^{\frac{W_a}{kT}},$$

для теплового старения бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей среднего напряжения:  $W$  – энергия активации процесса механической деструкции и  $W_a$  – энергия активации процесса термоокислительного старения, Дж;  $T$  – абсолютная температура;  $k$  – постоянная Больцмана;  $A$  – эмпирический коэффициент;  $\sigma$  – механическое напряжение в кабельной бумаге, Н/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент.

В процессе теплового старения тангенс угла диэлектрических потерь растет по экспоненциальному закону:

$$\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_0 \cdot e^{m(t-t_0)},$$

где  $\operatorname{tg}\delta_0$  – значение тангенса угла диэлектрических потерь при температуре, равной 20 °C,  $m$  – температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь. Для бумажно-пропитанной изоляции температурный коэффициент принимается равным  $m = 0,0186$  1/°C, для бумажно-пленочной – существенно меньше:  $m = 0,005 – 0,01$  1/°C. Для чисто пленочной изоляции можно принять  $m = 0$  1/°C.

Зависимость от температуры  $\operatorname{tg}\delta$  БПИ при разных значениях тангенса угла потерь при 20 °C показана на рис. 2: 1 –  $\operatorname{tg}\delta_0=0,003$ ; 2 –  $\operatorname{tg}\delta_0=0,004$ ; 3 –  $\operatorname{tg}\delta_0=0,006$ ; 4 –  $\operatorname{tg}\delta_0=0,008$ ; 5 –  $\operatorname{tg}\delta_0=0,01$ .

Очевидно, что между параметрами, характеризующими механическое и тепловое старение бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей, существует корреляционная связь. Если в результате механического старения получить критические значения, соответствующие исчерпанию механического ресурса, то на основе корреляционной связи можно получить критические значения тангенса угла диэлектрических потерь бумажно-пропитанной изоляции, соответствующее исчерпанию теплового ресурса.

**Цель статьи** – сформулировать критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией на основе корреляционной связи между усталостной прочностью кабельных бумаг и тангенсом угла диэлектрических потерь силовых кабелей среднего напряжения.

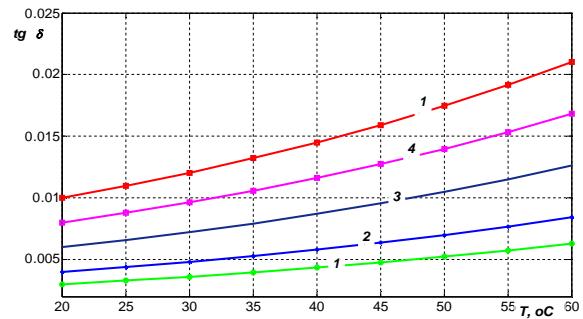


Рис. 2. Зависимость от температуры тангенса угла диэлектрических потерь бумажно-пропитанной изоляции

### КРИТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Момент достижения предельного состояния, т.е. фактический конец срока службы силового кабеля, можно определить по числу двойных перегибов, выдерживаемых полосками кабельных бумаг, полученных из фазной и поясной изоляции [5-6].

Интегральные функции распределения (ИФР) числа двойных перегибов  $N$  описываются логарифмически-нормальным законом. ИФР дают представление о среднем значении (на уровне доверительной вероятности 0,5) и о редких значениях  $N$  – на уровне доверительной вероятности 0,1 и менее. Так как интегральные функции распределения спрямляются в функциональном масштабе логарифмически-нормального закона распределения, то это дает возможность оценить значения параметра  $N$  в области малых вероятностей – путем аппроксимации прямых линий в область вероятностей меньше 0,01.

В процессе эксплуатации и теплового старения наблюдается более интенсивное старение поясной изоляции. В результате появляется различие в числе двойных перегибов для поясной и фазной изоляции силовых кабелей напряжением 1-10 кВ. Так, на рис. 3 приведены ИФР силового кабеля с бумажно-пропитанной изоляцией напряжением 10 кВ в исходном состоянии (кривые 1 и 2) и после дополнительного теплового старения (кривые 1' и 2').

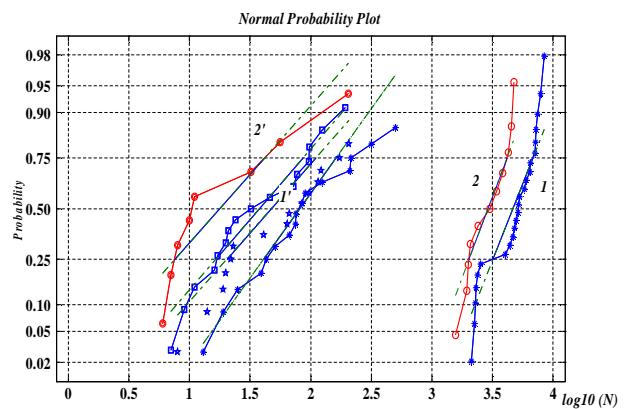


Рис. 3. Интегральные функции распределения усталостной прочности на излом полосок поясной и фазной изоляции силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией разной степени состаренности

Наблюдается различие по числу двойных перегибов поясной (кривые 2 и 2') и фазной (кривые 1 и 1') изоляции. Причем, по мере старения кабелей это различие возрастает (значения числа двойных перегибов смещаются в область меньших значений). Для предельно состаренных кабелей для поясной изоляции наблюдается излом (рис. 3, кривая 2') [7]. Установлены критерии предельного состояния БПИ по механическим характеристикам. Они определяются уменьшением числа двойных перегибов в 200 раз относительно исходного нового состояния. Критическое значение числа двойных перегибов предельно состаренной кабельной изоляции на уровне 50 % вероятности равно 10.

#### КРИТИЧЕСКИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ФАЗНОЙ И ПОЯСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ С УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

В силовом кабеле с БПИ непосредственно измерить характеристики каждого из компонентов изоляции: фазной или поясной изоляции по отдельности – невозможно. Любое измерение представляет собой результат совокупного влияния нескольких составляющих кабеля [8-11]. Совокупные измерения приводят к усреднению характеристик изоляции, из-за чего различия их компонентов мало заметны. Погрешности в оценке состояния изоляции возрастают.

Для определения индивидуальных характеристик фазной и поясной изоляции силовых кабелей по отдельности необходимо [8-11]:

1) выполнить совокупные измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных промежутков по 4-м схемам обследования: каждая из трех жил – против двух других и оболочки - три схемы измерения (для оценки свойств фазной изоляции) и три жилы вместе – против оболочки (для оценки свойств поясной изоляции)

2) решить систему линейных алгебраических уравнений 4-го порядка для нахождения индивидуальных характеристик  $\operatorname{tg}\delta$  фазной и поясной изоляции.

На рис. 4 приведены корреляционные зависимости между числом двойных перегибов (фазной (1) и поясной изоляцией (2)) и тангенсом угла диэлектрических потерь силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией.

Наблюдается отрицательная корреляция (рис. 4) между тангенсом угла диэлектрических потерь и числом двойных перегибов: большим значениям  $\operatorname{tg}\delta$  соответствуют меньшие значения числа двойных перегибов кабельной бумаги. Коэффициенты корреляции равны  $-0,9733$  и  $-0,9800$  для фазной и поясной изоляции соответственно.

Для поясной изоляции коэффициент корреляции больше, т.е. связь между тангенсом угла диэлектрических потерь и числом двойных перегибов – более тесная.

Для оценивания, т.е. определения критических значений тангенса угла диэлектрических потерь, соответствующего критическому значению числа двойных перегибов, найдено уравнение линейной регрессии для фазной и поясной изоляции по отдельности при значении доверительной вероятности  $p = 0,95$ .

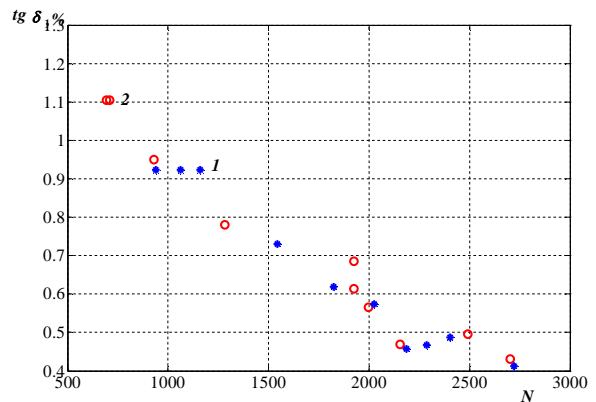


Рис. 4. Корреляционная зависимость между усталостной прочностью фазной и поясной изоляции и тангенсом угла диэлектрических потерь силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией

На рис. 5, 6 приведены результаты регрессионного анализа для фазной (рис. 5) и поясной (рис. 6) изоляции силовых кабелей напряжением 10 кВ соответственно.

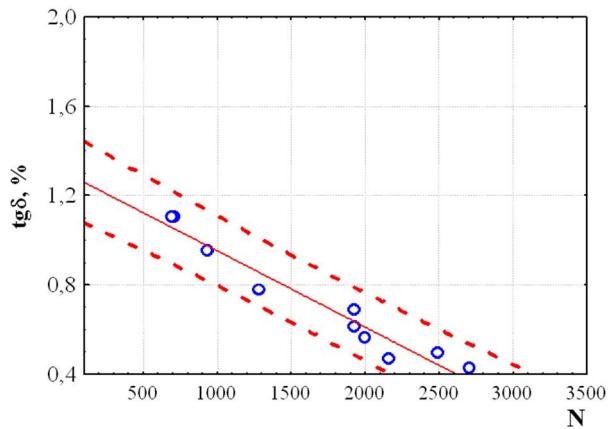


Рис. 5. К определению критического значения тангенса угла диэлектрических потерь фазной изоляции силовых кабелей с БПИ в случае линейной регрессии

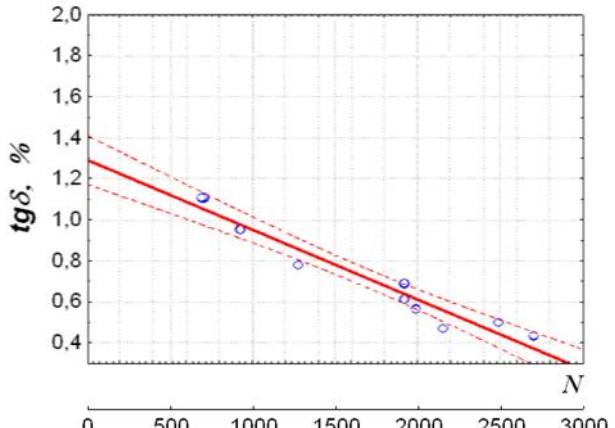


Рис. 6. К определению критического значения тангенса угла диэлектрических потерь поясной изоляции силовых кабелей с БПИ в случае линейной регрессии

Соответствующие уравнения линейной регрессии между числом двойных перегибов и тангенсом угла диэлектрических потерь имеют вид:

– для фазной изоляции:

$$\operatorname{tg} \delta_{\phi}^{\text{f}} = 1,2704 - 0,00034 * N, \% , \quad (1)$$

– для поясной изоляции:

$$\operatorname{tg} \delta_n^{\text{f}} = 1,2932 - 0,0003 * N, \% . \quad (2)$$

Так как механическое и тепловое старение бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей среднего напряжения описываются формулой Журкова и Аррениуса, т.е. экспоненциальными законами, то соответствующие уравнения экспоненциальной парной регрессии между усталостной прочностью и тангенсом угла диэлектрических потерь имеют вид:

– для фазной изоляции (рис. 7):

$$\operatorname{tg} \delta_{\phi}^{\text{p}} = 1,3916 \cdot e^{-0,0003N}, \% , \quad (3)$$

– для поясной изоляции (рис.8):

$$\operatorname{tg} \delta_n^{\text{p}} = 1,4961 \cdot e^{-0,0005N}. \% . \quad (4)$$

Критические значения тангенса угла диэлектрических потерь (в процентах) для частоты 50 Гц при критическом значении числа двойных перегибов, равном 10 на уровне 50 % вероятности, соответствующему критическому значению усталостной прочности кабельных бумаг, имеют значения:

– для фазной изоляции: 1,2673-1,3874 в предположении линейной и экспоненциальной парной регрессии;

– для поясной изоляции: 1,2900-1,4886 в предположении линейной и экспоненциальной парной регрессии соответственно.

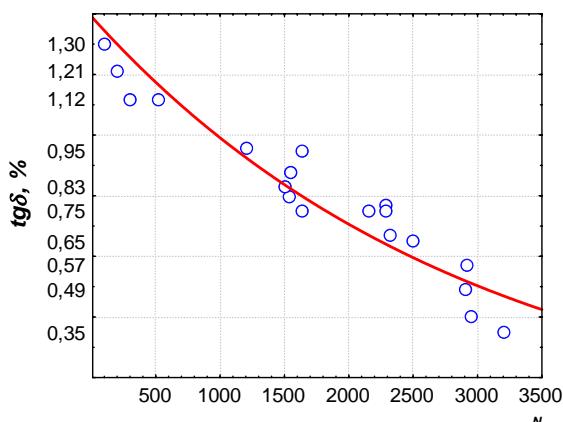


Рис. 7. К определению критического значения тангенса угла диэлектрических потерь фазной изоляции силовых кабелей с БПИ в случае экспоненциальной регрессии

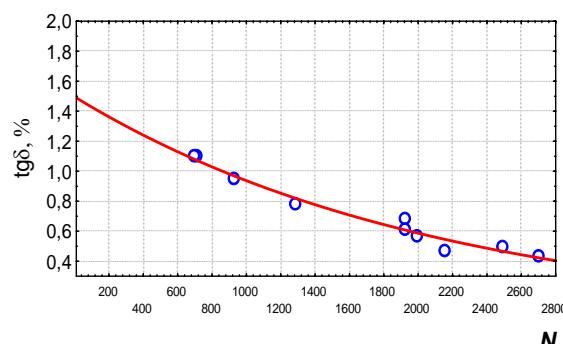


Рис. 8. К определению критического значения тангенса угла диэлектрических потерь поясной изоляции силовых кабелей с БПИ в случае экспоненциальной регрессии

На основании корреляционной связи между усталостной прочностью бумаги и  $\operatorname{tg}\delta$  и регрессионного анализа можно выделить пороговые значения (уровни) потерь, характеризующие техническое состояние силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией:

- 1) 0,4% и меньше – нормальное состояние изоляции;
- 2) 0,4-0,6% – есть начальные признаки старения изоляции;
- 3) 0,6-1,0% – умеренное старение изоляции (соответствующее, как показывают результаты усталостных испытаний кабельных бумаг на излом, исчерпанию около  $\frac{3}{4}$  ресурса);
- 4) 1,0-2% – критическое состояние изоляции, требующее ремонта линии;
- 5) свыше 2% – опасное состояние, которое может привести к тепловому пробою кабеля.

## ВЫВОДЫ

Наличие корреляционной связи между электрическими и механическими характеристиками бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей свидетельствует о возможности их неразрушающего контроля по тангенсу угла диэлектрических потерь фазной и поясной изоляции по отдельности.

Найдены уравнения линейной и экспоненциальной парной регрессии при значении доверительной вероятности  $p = 0,95$ , связывающие между собой усталостную прочность кабельных бумаг с тангенсом угла диэлектрических потерь фазной и поясной изоляции силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией.

Определены критические значения тангенса угла диэлектрических потерь для фазной и поясной изоляции по отдельности, соответствующие критическому значению числа двойных перегибов. Для оценки степени старения БПИ силовых кабелей в эксплуатации необходимо использовать консервативные оценки значений тангенса угла диэлектрических потерь, определенные на основании линейной регрессии в соответствии с (1) и (2).

На основании корреляционной связи между усталостной прочностью бумаги и  $\operatorname{tg}\delta$  определены пороговые значения (уровни) тангенса угла диэлектрических потерь силовых кабелей, характеризующие техническое состояние бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностика и мониторинг кабельных сетей средних классов напряжения / К.П. Кадомская, В.Е. Качесов, Ю.А. Лавров и др. // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48-51.
2. Кудрин Б.И. Ранговый анализ техноценоза "Кабельная сеть 3-10 кВ ОАО "Западно-Сибирский металлургический комбинат" / Б.И. Кудрин, Г.М. Лебедев, А.Ю. Гапоненко // Промышленная энергетика. – 2007. – № 3. – С. 5-12.
3. Привалов И.Н. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий номинальным напряжением 6-35 кВ // Электротехнический рынок. – 2008. – № 2.
4. Кустов А. Существует ли в России диагностика силовых кабельных линий и электрооборудования... и зачем она нужна? / Энергетика и промышленность России. – 2006. – № 8 (72).
5. Москвитин Е.С. Сложность применения неразрушающих методов испытания бумажно-масляной изоляции кабе-

лей при диагностике их состояния / Е.С. Москвитин. // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Материалы XVII Международной научно-практической конференции 22-22 мая 2009. Харьков: Часть I. – С. 542.

6. Москвитин Е.С. Оценка технического состояния высоковольтных кабелей с бумажно-масляной изоляцией по числу двойных перегибов / Е.С. Москвитин // Вестник НТУ "ХПИ". – №3 4. – 2006. – С. 34-40.

7. Беспрованных А.В. Число двойных перегибов как индикатор степени старения кабельных бумаг / А.В. Беспрованных, Е.С. Москвитин. – Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 3. – С. 62-66.

8. Беспрованных А.В. / Обследование изоляции трехфазных кабелей в металлической оболочке // А.В. Беспрованных, [Б.Г. Набока], Е.С. Москвитин // Электричество. – №1. – 2010. – С. 48-54.

9. [Набока Б.Г.] Критерии по тангенсу угла диэлектрических потерь для оценки технического состояния силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией в эксплуатации / [Б.Г. Набока], А.В. Беспрованных, Е.С. Москвитин и др. //

Вестник НТУ "ХПИ". – 2010. – №5. – С. 76-83

10. [Набока Б.Г.] Диагностика кабельных линий энергосистем по тангенсу угла диэлектрических потерь и постоянной времени саморазряда бумажно-пропитанной изоляцией / [Б.Г. Набока], А.В. Беспрованных, Е.С. Москвитин и др. // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 2. – С. 65-69.

11. Москвитин Е.С. Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по изменению диэлектрических характеристик изоляционных промежутков / Е.С. Москвитин // Вестник НТУ "ХПИ". – 2011. – № 3. – С. 95-106.

**Bibliography (transliterated):** 1. Diagnostika i monitoring kabel'nyh setej srednih klassov napryazheniya / K.P. Kadomskaya, V.E. Kachesov, Yu.A. Lavrov i dr. // `Elektrotehnika. – 2000. – № 11. - S. 48-51. 2. Kudrin B.I. Rangovyy analiz tehnocenoza "Kabel'naya set' 3-10 kV OAO "Zapadno-Sibirskij metallurgicheskij kombinat" / B.I. Kudrin, G.M. Lebedev, A.Yu. Gaponenko // Promyshlennaya `energetika. - 2007. - № 3. - S. 5-12. 3. Privalov I.N. Nerazrushayuschaya diagnostika silovyh kabel'nyh linij nominalnym napryazheniem 6-35 kV // `Elektrotehnicheskij rynok. - 2008. - № 2. 4. Kustov A. Suschestvuet li v Rossii diagnostika silovyh kabel'nyh linij i `elektrooborudovaniya... i zachem ona nuzhna? / `Energetika i promyshlennost' Rossii. - 2006. - № 8 (72). 5. Moskvitin E.S. Slozhnost' primeneniya nerazrushayuschih metodov ispytaniya bumazhno-maslyanoj izolyacii kablej pri diagnostike ih sostoyaniya / E.S. Moskvitin. // Informacionnye tehnologii:

nauka, tekhnika, tehnologiya, obrazovanie, zdorov'e: Materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 22-22 maya 2009. Har'kov: Chast' I. - S. 542. 6. Moskvitin E.S. Ocenka tehnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnyh kablej s bumazhno-maslyanoj izolyacij po chislu dvojnyh peregibov / E.S. Moskvitin // Vestnik NTU "HPI". - №3 4. - 2006. - S. 34-40. 7. Besprozvannyh A.V. Chislo dvojnyh peregibov kak indikator stepeni stareniya kabel'nyh bumag / A.V. Besprozvannyh, E.S. Moskvitin. – Elektrotehnika i elektromehanika. – 2011. – № 3. – S. 62-66. 8. Besprozvannyh A.V. / Obsledovanie izolyaci trehfaznyh kablej v metallicheskoy obolochke // A.V. Besprozvannyh, B.G. Naboka, E.S. Moskvitin // `Elektrichestvo. - №1. - 2010. - S. 48-54. 9. Naboka B.G. Kriterii po tangensu ugla di`elektricheskikh poter' dlya ocenki tehnicheskogo sostoyaniya silovyh kablej s bumazhno-propitannoj izolyacij v `ekspluatacji / B.G. Naboka, A.V. Besprozvannyh, E.S. Moskvitin i dr. // Vestnik NTU "HPI". - 2010. - №5. - S. 76-83. 10. Naboka B.G. Diagnostika kabel'nyh linij `energosistem po tangensu ugla di`elektricheskikh poter' i postoyannoj vremeni samorazryada bumazhno-propitannoj izolyacij / B.G. Naboka, A.V. Besprozvannyh, E.S. Moskvitin i dr. // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2011. - № 2. - S. 65-69. 11. Moskvitin E.S. Kontrol' processov stareniya silovyh kablej s bumazhno-propitannoj izolyacij po izmeneniyu di`elektricheskikh harakteristik izolyacionnyh promezhutkov / E.S. Moskvitin // Vestnik NTU "HPI". - 2011. - № 3. - S. 95-106.

Поступила 25.04.2013

Безпрованных Ганна Вікторівна, д.т.н., проф.,  
Москвін Е.С., к.т.н.

Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"  
кафедра електроізоляційної та кабельної техніки  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

тел. (057) 707-60-10, e-mail:bezprozvannych@kpi.kharkov.ua

Bezprozvannych G.V., Moskvitin E.S.

**Estimation criteria for degree of paper-impregnated insulated power cable ageing.**

Correlation between parameters characterizing mechanical and thermal ageing of paper-impregnated insulation of medium voltage power cables is revealed. On the basis of linear and exponential regression analysis at confidence coefficient of 0.95, critical values of dielectric loss tangent of wrapping and phase insulation corresponding to the cable life termination are found.

**Key words – power cables, paper-impregnated insulation, mechanical and thermal ageing, double bends number, dielectric loss tangent, linear and exponential regression analysis.**

## ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ КРИТЕРІЙВ ПРИ РОЗРАХУНКУ І КОНСТРУЮВАННІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

*Виконано аналіз результатів розрахунку пропускної спроможності силових кабелів на напругу 220 кВ. Робота присвячена створенню системи розрахунку допустимого струму високовольтних силових кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією.*

*Выполнен анализ результатов расчетов пропускной способности силовых кабелей на напряжение 220 кВ. Работа посвящена созданию системы расчета допустимого тока высоковольтных силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией.*

**Постановка проблеми.** Для економічного аналізу технічних рішень необхідним є аналіз так званих "невикористаних можливостей", котрий може бути виконаний тільки шляхом включення економічного аналізу в процес прийняття конкретного технічного рішення. Високовольтні кабелі з пластмасовою ізоляцією є інноваційною продукцією для кабельної техніки України. Ця продукція має принципові відмінності:

- більші, ніж у традиційних маслонаповнених кабелів, площині перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює одножильну конструкцію кабелю, та як наслідок, особливості їх прокладання і використання, наприклад, прокладання у площині з обов'язковою транспозицією електропровідних екранів при заземленні їх на обох кінцях лінії;
- підвищена гранично допустима температура ізоляції;
- суттєва залежність тепlopровідності і теплоємності ізоляції від температури;
- більша ціна інноваційної продукції порівняно з традиційною.

Ці відмінності зумовлюють необхідність, по-перше, їх врахування при визначенні навантажувальної спроможності кабелів, по-друге, включення до відповідних моделей економічної складової з метою економічної оптимізації технічних рішень. Такі кабелі мають ряд переваг і найперша – підвищена робоча температура (до 90 °C), що дозволяє збільшувати навантажувальну спроможність. За цим слід враховувати те, що такі кабелі суттєво нагрівають оточуюче середовище.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для прийняття економічно виважених рішень при визначенні пропускної спроможності нових для вітчизняної кабельної техніки силових високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією, необхідне вирішення системи рівнянь, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю. В [1] запропоновано метод використання універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло і масообміну в високовольтних кабелях з пластмасо-

вою ізоляцією для дослідження їх пропускної спроможності шляхом інтервального оцінювання параметрів моделей.

Наприклад, для одножильного кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ використано систему рівнянь, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри і дозволяють обчислити максимальну напруженість радіального електричного поля в однорідній ізоляції, номінальний струм, затрати на матеріал ізоляції, якщо відомі ціна  $C_{iz}$  одного кілограма матеріалу, питома маса  $\gamma_{iz}$  і об'єм  $V_{iz}$  на одиницю довжини.

Таку модель можна назвати трьохвимірною за кількістю простих моделей, що її утворюють і відповідно за кількістю змінних, які одночасно визначають. Ці змінні – тривало допустимий струм кабелю  $I_h$ , товщина ізоляції  $\Delta_{iz}$  і витрати на матеріали для ізольованої жили  $Z$ , – одночасно визначаються за різних значень багатьох параметрів, – максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю, максимальної допустимої температури ізоляції та ін. прості моделі, які складають систему, можна ускладнювати, залежно від необхідності врахування особливостей конструкції кабелю, умов його прокладання і економічних реалій конкретного виробника; до системи можуть і мати бути залучені технологічні моделі, які пов'язують технічні та споживчі параметри кабелю з його технологічними параметрами; очевидно, що зв'язок з економічною складовою системи, а значить і необхідність спільноговирішення, посилиться.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\max} = \frac{U}{(r_{\mathcal{H}} + \Delta_e) \cdot \ln \left( \frac{r_{\mathcal{H}} + \Delta_e + \Delta_{iz}}{r_{\mathcal{H}} + \Delta_e} \right)}; \\ I_h = \sqrt{\frac{\Theta_1 - \Theta_2 - P_a \cdot (0,5 \cdot S_{iz} + S_{3n} + S_{oc})}{R_g(\Theta_1) \cdot (S_{iz} + (1 + k_e) \cdot (S_{3n} + S_{oc}))}}; \end{array} \right. \quad (1)$$

$$Z = C_{iz} \cdot \gamma_{iz} \cdot V_{iz}, \quad (2)$$

$$Z = C_{iz} \cdot \gamma_{iz} \cdot V_{iz}, \quad (3)$$

© О.В. Голик

де  $P_a$  – втрати в ізоляції,  $U$  – фазна напруга,  $r_{\text{ж}}$ ,  $\Delta_e$  – радіус жили, товщина напівпровідного екрану;  $k_e$  – коефіцієнт втрат в мідному електропровідному екрані кабелю (для іншої конструкції це може бути коефіцієнт спільних втрат в такому екрані і немагнітній броні);  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  – максимальна допустима температура жили та температура оточуючого середовища;  $S_{\text{iz}}$ ,  $S_{\text{зп}}$ ,  $S_{\text{oc}}$  – відповідно, значення теплового опору для ізоляції, захисного покриву, оточуючого середовища;  $R_g(\Theta_1)$  – електричний опір жили при максимально допустимій температурі.

**Ціль і задачі дослідження.** Порівняти пропускну спроможність і питомі затрати на ізоляцію для кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ, одержані як результати спільногого вирішення системи моделей (1) – (3) при різних значеннях товщини ізоляції, максимальної напруженості електричного поля в ній. Мета порівняння: визначити технічну доцільність мінімізації питомих затрат на ізоляцію для кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ.

Крім того необхідне визначення інтервалів можливих значень параметрів моделі, виділення серед цих параметрів змінних, які є такими для всіх розрахункових співвідношень.

Основний матеріал дослідження. Формули (1) – (3) взаємопов'язані спільним параметром – товщиною ізоляції  $\Delta_{iz}$ . Для забезпечення надійності кабелю має бути обмежена зверху (не більше) максимальна напруженість електричного поля в ізоляції. Це вимагає обмеження  $\Delta_{iz}$  знизу (не менше). Очевидно, що чим більше значення  $\Delta_{iz}$ , тим більші затрати на матеріал ізоляції  $Z$  і тим більший тепловий опір ізоляції, а отже може бути меншою пропускна спроможність кабелю. Таким чином, тільки спільне вирішення (1) – (3) для конкретної марки кабелю може дозволити вибрати економічно і технічно придатне рішення.

Залежність відношення об'єму  $V$  ізоляційних матеріалів кабелю до товщини ізоляції  $\Delta_{iz}$  від  $\Delta_{iz}$  має мінімум [1], тому з умови  $\partial(V/\Delta_{iz})/\partial\Delta_{iz} = 0$  витікає можливість аналітично оцінити оптимальну за питомою вартістю товщину ізоляції кабелю:

$$\Delta_{iz} = \sqrt{\left( \sqrt{\frac{4 \cdot F_n}{\pi \cdot \eta}} + \Delta_{3n} + 2 \cdot \Delta_e \right)} \cdot (\Delta_{3n} + 2 \cdot \Delta_e), \quad (4)$$

де  $F_n$  – площа номінального перерізу жили;  $\eta$  – коефіцієнт заповнення жили.

Залежність оптимальної за питомою вартістю товщини ізоляції кабелю від номінальної площині перерізу жили за (4) наведено на рис. 1. Розрахунки за системою (1) – (3) свідчать про те, що саме використання оптимальної товщини ізоляції дозволяє мінімізувати не тільки питому вартість (в умовних одиницях на один міліметр товщини) ізоляційних матеріалів кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ (рис. 1), але й одночасно мінімізувати макси-

мальну напруженість електричного поля в ізоляції (рис. 2).

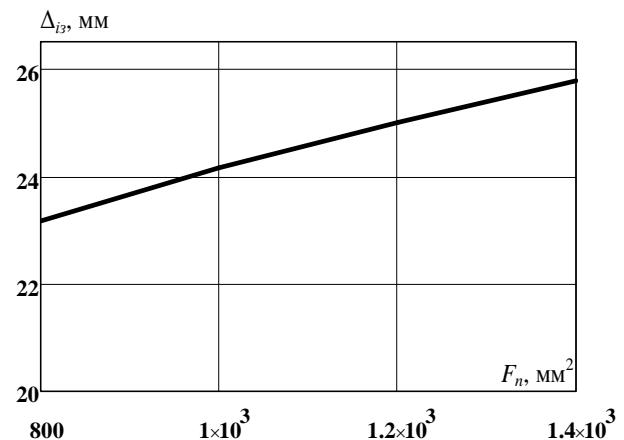


Рис. 1. Залежність оптимальної товщини ізоляції, визначеній за (4), від номінальної площині перерізу струмопровідної жили кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ

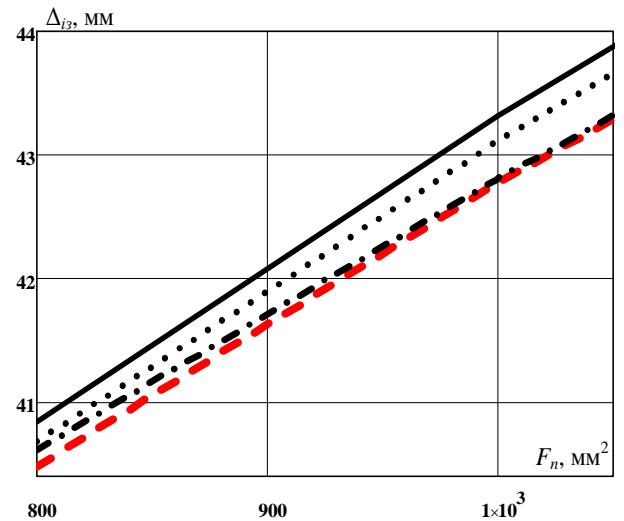


Рис. 2. Залежності питомої вартості в умовних одиницях (на один міліметр товщини) ізоляційних матеріалів від номінальної площині перерізу струмопровідної жили кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ: чорні криві відповідають різним товщинам ізоляції в діапазоні від 19 мм (суцільна чорна крива) до 26 мм (штрихпунктирна чорна крива); червона шрихова крива відповідає оптимальним товщинам ізоляції, визначенім за (4), які знаходяться в діапазоні від 23,2 мм до 25,7 мм залежно від площині перерізу жили

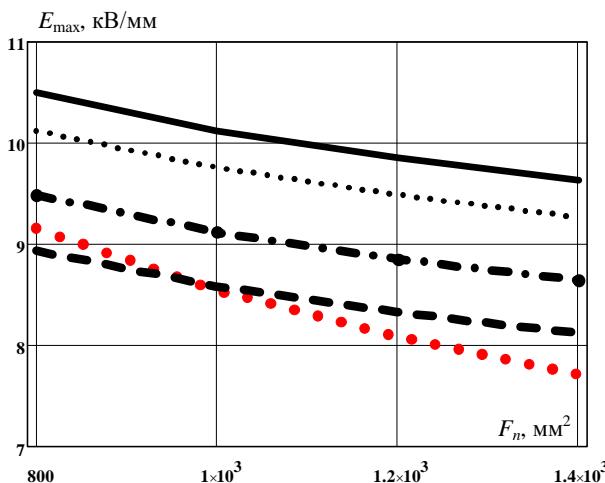


Рис. 3. Залежності максимальної напруженості електричного поля  $E_{\max}$  в ізоляції від номінальної площини перерізу  $F_n$  струмопровідної жили кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ: чорні криві відповідають різним товщинам ізоляції в діапазоні від 19 мм (суцільна чорна крива) до 24 мм (штрихова чорна крива); червона пунктирна крива відповідає оптимальним товщинам ізоляції, визначенням за (4), які знаходяться в діапазоні від 23,2 мм до 25,7 мм залежно від площині перерізу жили

## ВИСНОВКИ

1. Використання оптимальної за питомою вартістю товщини ізоляції кабелю дозволяє мінімізувати не тільки питому вартість (в умовних одиницях на один міліметр товщини) ізоляційних матеріалів кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ, але й одночасно мінімізувати максимальну напруженість електричного поля в ізоляції.

2. Врахування того, що ізоляція, призначена для використання при більш високих градієнтах, є дорожчою, спричиняє зміщення відповідного мінімуму в бік менших градієнтів порівняно з одержаною. Тому для прийняття конкретних технічних рішень необхідно інформація щодо залежності вартості ізоляції (зокрема, технологічних витрат) від напруженості електричного поля.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Щебенюк Л.А., Антонець Т.Ю. До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією. // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – Вип. 42. – С. 43-46.

2. Золотарьов В.М. Системний підхід до управління якістю – фундамент перспективного розвитку підприємства / В.М. Золотарьов // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2002. – № 1. – С. 57-61.

**Bibliography (transliterated):** 1. SCHebenyuk L.A., Antonec' T.Yu. Do vyznachennya propusknoi spromozhnosti visokovoltnih silovih kabeliv z plastmasovoou izolyacieu. // Visnik NTU "HPI". - 2011. - Vip. 42. - S. 43-46. 2. Zolotar'ov V.M. Sistemnj pidhid do upravlinnya yakistyu - fundament perspektivnogo rozvitiu pidprietmstva / V.M. Zolotar'ov // Standartizaciya, sertifikaciya, yakist'. - 2002. - № 1. - S. 57-61.

Надійшла 10.05.2013

Голік О.В., к.т.н., доц.

Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"  
кафедра "Електроізоляціонної и кабельної техники"  
61002, Харків, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 7076663

Golik O.V.

**Problems of economic criteria application to calculation and design of high-voltage plastic-insulated power cables.**

Results of cable transmitting capacity calculation for voltage of up to 220 kV are analyzed. The work is devoted to creation of a current rating calculation technique for high-voltage cross-linked polyethylene cables.

**Key words – high-voltage cables, calculation technique.**

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень процесів руйнування поверхневого шару електричної ізоляції при впливі імпульсами грозової перенапруги, показано їх вплив на ресурс ізоляційної конструкції, розглянуто причини появи водних трийнгів у поверхневих шарах полімерної ізоляції.*

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов разрушения поверхностного слоя электрической изоляции при воздействии импульсами грозового перенапряжения, показано их влияние на ресурс изоляционной конструкции, рассмотрены причины появления водных трийнгов в поверхностных слоях полимерной изоляции.*

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Снижение веса и габаритов высоковольтного оборудования связано с необходимостью повышения рабочих напряженностей электрического поля в электрической изоляции, повышением температурного индекса применяемых изоляционных материалов, использованием новых теплостойких материалов. Электрическая прочность поверхностного слоя в десятки раз ниже пробивной прочности применяемых материалов и она в первую очередь определяет ресурс конструкции в целом.

Наличие примесей, дефектов в изоляции влияет не только на ее прочность, но и изменяет профиль силовых и эквипотенциальных линий картины электрического поля на поверхностном слое, что позволяет с помощью электроемкостных преобразователей изучать это явление.

При рассмотрении процессов развития поверхностного разряда необходимо учитывать влияние ряда факторов. Разряд происходит вдоль границы раздела сред твердого диэлектрика со слоями твердого, газообразного или жидкого диэлектриков. Каждая фаза развития разряда – корона, скользящий разряд, перекрытие – зависит от неоднородности электрического поля, соотношения нормальной и тангенциальной составляющих, вида диэлектрика и его диэлектрической проницаемости, внешних факторов.

Считают [1], что нормальная составляющая поля должна прижимать разряд к поверхности, замедляя его продвижение. Это усиливает термическое воздействие на диэлектрик, разогревая поверхность, тем самым, облегчая процесс перекрытия. По мнению автора [2] большое влияние на процесс поверхностного разряда оказывает концентрация зарядов на поверхности диэлектрика, что является причиной снижения пробивного напряжения. Перераспределение приложенного напряжения происходит также в случае образования между электродом и диэлектриком промежуточной среды (воздушное включение, влага), когда напряженность поля в диэлектрической среде обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости включения. Это свидетельствует об определяющей роли в поверхностном разряде ионизационных процессов, условий формирования поверхностного объемного заряда.

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В [1, 2] показано, что на начальное коронирование на поверхности электродов оказывает наличие микропроступов, неплотное прилегание электродов к поверхности диэлектрика. Из-за различия диэлектрических проницаемостей материала слоя диэлектрика и окружающей среды, а также воздушных и водных включений, создается местное увеличение напряженности электрического поля, которое приводит к ионизационным процессам и появлению начальных электронов. Кроме того, при малых зазорах между электродом и диэлектриком удаление газов и паров воды затруднено. Все это приводит к более интенсивному повреждению поверхности диэлектриков в предразрядной стадии близи места касания катода и диэлектрика.

Вопросам ионизации контактной зоны металлического электрода и контактирующего с ним диэлектрика посвящены работы, в которых рассмотрены вопросы создания источников электронов с использованием взрывной эмиссии микроострий. Показано, что, обладая малым временем взрыва, порядка нескольких десятков наносекунд, энергия электронов в пучке может достигать  $3 \cdot 10^6$  эВ и ток до  $5 \cdot 10^4$  А [3, 4]. Электронно-микроскопическое наблюдение острый показывает, что они содержат много тонких микроострий радиусом 0,1-1 мкм, на которых напряженность поля усиливается в десятки и более раз, что способствует процессу автоэлектронной эмиссии электронов.

В [5] показано, что при резких перенапряжениях на электродах у их поверхности возникнут сильные электрические поля, которые приведут к образованию стримера и лавины, т.е. к искровому пробою. Такой пробой, при котором высокая напряженность поля приложена к острию в течение наносекунд, не перекрывает разрядный промежуток. Образование искры подавляется или тормозится, если перенапряжение сниается до того, как стример пересек разрядный промежуток; отсюда и название такого процесса "незавершенные электрические разряды". Особенностью такого разряда является наличие намного больших токов и напряжения одновременно при соответствующих более высоких значениях температуры.

© Ю.Г. Гонтарь, Д.В. Лавинский

Анализируя перечисленные работы можно сделать вывод, что первопричиной разрушения диэлектрического материала в зоне "металлический электрод–диэлектрик" является автоэлектронная эмиссия и взрывная эмиссия, возникающие в зоне повышенной напряженности поля.

### МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗОЛЯЦИИ

Одним из возможных механизмов разрушения поверхностного слоя диэлектрика в области контакта электрода с изоляционным материалом описан в [3]. Явления, предшествующие перекрытию изоляции, объясняют большой величиной предразрядного тока. Эмиттируемые с вершины микровыступа автоэлектроны, проходя зону повышенной напряженности поля, получают ускорение  $\Delta U = E_a a$ , где  $a$  – высота выступа,  $E_a$  – напряженность электрического поля на расстоянии  $a$  от вершины микровыступа. Вблизи микровыступа электроны получают энергию порядка сотен электроновольт. Возникающие при ионизации положительные ионы втягиваются в середину электронного пучка и двигаются в направлении эмиттера, бомбардируя эмиттер, разогревают его, что ведет к увеличению первичного электронного тока. Это в свою очередь увеличивает интенсивность бомбардировки электронами диэлектрика, испаряется часть вещества диэлектрика, в зоне бомбардировки диэлектрика пучком образуется облако газов и паров, причем молекулы разлетаются по закону косинуса [7]. Электронный пучок, проходя через такое облако, производит ионизацию, и внутрь пучка снова втягиваются положительные ионы, которые увеличивают электронный ток с эмиттера, разогревая последний, а также, нейтрализуя частично объемный отрицательный заряд пучка электронов. При определенных условиях этот процесс может быть кумулятивным, тогда происходит заметное повреждение поверхности диэлектрика при значительной величине измеряемого тока, что может закончиться расплавлением и испарением части микровыступа. Перекрытие по поверхности диэлектрика может наступить в том случае, если облако паров и газов заполнит межэлектродный промежуток и разряд развивается в этой среде.

Рассматривая возможный механизм повреждения диэлектрика вблизи катода, следует отметить, что в непосредственной близости от катода (в том месте, где зазор между катодом и поверхностью диэлектрика очень мал, т.е.  $l_n$  мало) повреждения диэлектрика более интенсивны. Это обстоятельство можно объяснить тем, что  $l_n$  по величине близко к величине микровыступов в этом месте. Кроме того, при малых зазорах между катодом и диэлектриком удаление молекул газов и паров затруднено. Комплекс этих факторов и приводит к более интенсивному повреждению поверхности диэлектриков в предразрядной стадии вблизи места касания катода и диэлектрика.

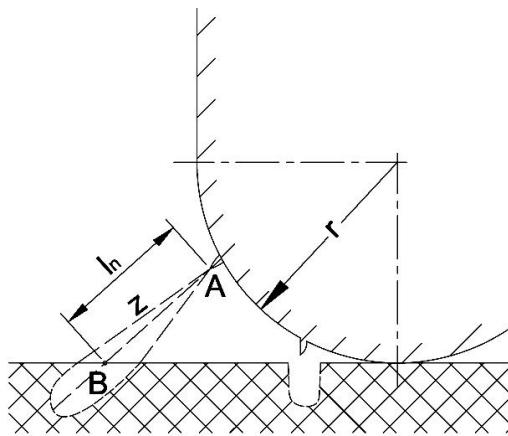


Рис. 1. Схема взаимодействия электронного пучка с диэлектриком

### АКТИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Свободные электроны, атомы и радикалы, ультрафиолетовое излучение являются активными компонентами плазмы, воздействующей на контактный слой полимера с электродом. Наличие коротких импульсов высокой напряженности поля и высокой температуры приводят к интенсивным плазмохимическим реакциям и воздействию ультрафиолетового излучения. Сам процесс активации длится миллисекунды, но этого времени достаточно, чтобы изменить свойства поверхностного слоя. Изменение химического состава тонкого слоя поверхности можно определить по изменению контактного угла смачиваемости капли влаги на поверхности активированного плазмой полимера. Взаимодействие с плазмой приводит к образованию полярных групп в поверхностном слое, росту поверхностной энергии полимера и как следствие к увеличению смачиваемости и величине адгезии к металлам и органическим веществам. В результате этого процесса гидрофильность слоя полиэтилена сохраняется до 12 месяцев. Активация поверхностного слоя в плазме сопровождается процессом разрушения поверхностного слоя и удалением при этом газообразных продуктов. Глубина прогрева материала  $\delta_c$  может быть представлена в виде [8]:

$$\delta_c = \frac{\lambda_c}{\rho_0 v C_{экв}} \ln \left[ 1 + \frac{C_{экв} (T_\omega - T^*)}{C_0 (T^* - T_0) + \Delta H^*} \right], \quad (1)$$

где  $\lambda_c$  – теплопроводность материала выше слоя разложения;  $\rho_0$  – плотность непрореагировавшего материала;  $v$  – линейная скорость перемещения поверхности за счет ее разрушения;  $C_{экв}$  – эквивалентная теплоемкость прореагировавшего слоя;  $C_0$  – теплоемкость полимера;  $T_\omega$  – температура разрушения;  $T^*$  – температура термического разложения;  $T_0$  – температура непрореагировавшего материала;  $\Delta H^*$  – тепловой эффект физико-химических превращений.

Наибольшая скорость уноса материала полимера происходит в кислородной среде и для полиэтилена составляет до  $0,42 \text{ мг}/\text{см}^2 \cdot \text{час}$ .

Данный процесс можно считать одним из основных при выяснении причин появления водных дендритов с поверхностного слоя изоляции. Процессы

выноса материала в зоне коронного и незавершенного коронного разрядов являются причиной появления микротрецин и зарождения водных дендритов в материале изоляции.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗОЛЯЦИИ

Рассмотрим постановку задачи расчета электростатического поля, система уравнений для которого имеет вид:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho; \quad (3)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}; \quad (4)$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\rho$  – объемная плотность свободных зарядов;  $\vec{D}$  – вектор индукции электрического поля;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

На границе  $L^n$  раздела сред ( $n-1$ ) и ( $n+1$ ) с различными диэлектрическими проницаемостями векторы электрического поля должны удовлетворять следующим граничным условиям:

$$E_{\tau}^{n-1} = E_{\tau}^{n+1}, \quad (5)$$

$$D_n^{n-1} = D_n^{n+1}, \quad (6)$$

где  $E_{\tau}^{n-1}, E_{\tau}^{n+1}$  – касательные к границе раздела двух сред компоненты вектора  $\vec{E}$ ;  $D_n^{n-1}, D_n^{n+1}$  – нормальные к границе раздела двух сред компоненты вектора  $\vec{D}$ .

Безвихревой характер электростатического поля позволяет ввести скалярный магнитный потенциал  $U$ :

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} U. \quad (7)$$

Таким образом, систему уравнений (2)–(4) можно свести к уравнению Пуассона относительно скалярного потенциала:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\rho}{\epsilon} = 0. \quad (8)$$

Рассмотрим задачи электростатики для системы проводник-изоляция-оплётка, расчетная схема которой представлена на рис. 2.

Геометрия и граничные условия задачи позволяют рассмотреть ее в осесимметричной постановке, для которой уравнение (8) в цилиндрической системе координат при отсутствии свободных зарядов преобразуется к виду:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0. \quad (9)$$



Рис. 2. Расчетная схема

Граничные условия для уравнения (9) рассматриваем в виде условий Дирихле:

$$U(r, z)_{r, z \in \Gamma} = U^*, \quad (10)$$

где  $\Gamma$  – граница области.

Для сформулированной выше задачи электростатики проблема решения краевой задачи для дифференциального уравнения (9) с граничными условиями (10) эквивалентна задаче отыскания минимума следующего функционала, для которого дифференциальное уравнение (9) служит уравнением Эйлера [10]:

$$I = \iint_S \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} r dS. \quad (11)$$

Задача численно реализована с использованием метода конечных элементов (МКЭ). В результате показано, что наличие неоднородности в материале изоляции приводит к искажению картины распределения изолиний потенциала. Данный факт может быть положен в основу создания методики контроля качества изоляции.

## ВЫВОДЫ

1. Наиболее часто разрушение ПЭ и образование микропор происходит в результате усиления электрического поля в местах контакта электрода (экрана кабеля) с полимерным материалом и неоднородности контактной поверхности.

2. В местах повышенной напряженности поля происходит модификация поверхности полимера, усиление гидрофильности поверхности, а водный триинг по существу представляет собой процесс усталостного разрушения полимера под воздействием поля и окружающей среды. Роль поверхностно-активной среды играет вода, имеющаяся в порах. При наложении поля поверхностное натяжение на границе ПЭ–вода резко падает. Причиной разрушения ПЭ является процесс, который возникает в результате резкого перепада значений  $\epsilon$  на границе ПЭ–вода, электронного и теплового воздействия. В объеме ПЭ вблизи заполненного водой микропор образования термомеханическое напряжение, которое приводит к потере массы ПЭ и образованию микротрецин. Вода, попадая в микротрецины, усиливает процесс дальнейшего развития водного триинга.

3. На скорость прорастания водного триинга ВТ влияет форма приложенного напряжения. При импульсных перенапряжениях положительной полярности ВТ развивается быстрее благодаря образованию объемного заряда в зоне ионизации.

4. Электрическая прочность поверхностного слоя зависит также от сферолитной структуры, канал разряда формируется преимущественно в межсферолитном пространстве, имеющем более рыхлую и совершенную структуру.

5. Замедлить скорость роста ВТ можно известными технологическими и конструктивными приемами, а именно: высокое качество изготовления кабеля (чистота поверхности электролов; отсутствие микро-

выступов; однородность и чистота изоляционного материала; отсутствие пор с недопустимыми размерами; защита электрической изоляции от проникновения влаги металлическим экраном; введение присадок в ПЭ, препятствующих распространению ВТ.)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений / Д.В. Разевиг, В.П. Ларionов, Л.Ф. Дмоховская, Ю.С. Пинталь. – М.: Энергия, 1976. – 487с.
2. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г.И. Сканави. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 910 с.
3. Киндяков В. С. Эмиссия электронов перед перекрытием по поверхности диэлектриков в вакууме / В. С. Киндяков // Труды СибНИИЭ. Сер.: Электрофизические исследования в области электрической изоляции. – М.: Энергия, 1970. – С. 47-63.
4. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов / Г.А. Месяц. – М.: Советское радио, 1976. – 256 с.
5. Okress E.C., Vincent J.H., Ta-Kuan Chian "Suppressed or arrested electric discharges in gases", Proceedings of the IEEE, vol.55, Dec. 1967, pp. 113-114.
6. Елинсон М.И. Автоэлектронная эмиссия / М.И. Елинсон, Г.Ф. Васильев. – М.: Государственное издательство физико-математический литературы, 1958. – 274 с.
7. Холлэнд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме / Холлэнд Л. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 608 с.
8. Полежаев Ю.В. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юрьевич. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
9. Тозони О.В. Расчет трехмерных электромагнитных полей / Тозони О.В., Маергойз И.Д. – К.: Техника, 1974. – 352 с.
10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Razevig D.V. Tehnika vysokih napryazhenij / D.V. Razevig, V.P. Larionov, L.F. Dmohovskaya, Yu.S. Pintal'. - M.: 'Energiya', 1976. - 487s. 2. Skanavi G.I. Fizika di'elektrikov (oblast' sil'nyh polej) / G.I. Skanavi. - M.: GIFML, 1958. - 910 s. 3. Kindyakov V. S. 'Emissiya elektronov pered perekrytiem po poverhnosti di'elektrikov v vakuume / V. S. Kindyakov // Trudy SibNII'E. Ser.: 'Elektrofizicheskie issledovaniya v oblasti elektricheskoy izolyacii. -

M.: 'Energiya, 1970. - S. 47-63. 4. Mesiac G.A. Generirovanie moschnyh nanosekundnyh impul'sov / G.A. Mesiac. - M.: Sovetskoe radio, 1976. - 256 s. 5. Okress E.C., Vincent J.H., Ta-Kuan Chian "Suppressed or arrested electric discharges in gases", Proceedings of the IEEE, vol.55, Dec. 1967, pp. 113-114. 6. Elinson M.I. Avto'elektronnaya 'emissiya / M.I. Elinson, G.F. Vasil'ev. - M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskij literatury, 1958. - 274 s. 7. Holl'end L. Nanesenie tonkih plenok v vakuume / Holl'end L. - M.: Gos'energoizdat, 1963. - 608 s. 8. Polezhaev Yu.V. Teplovaya zaschita / Yu.V. Polezhaev, F.B. Yurevich. - M.: 'Energiya, 1976. - 392 s. 9. Tozoni O.V. Raschet trehmernyh elektromagnitnyh polej / Tozoni O.V., Maergorz I.D. - K.: Tehnika, 1974. - 352 s. 10. Zenkevich O. Metod konechnykh 'elementov v tehnike / Per. s angl. - M.: Mir, 1975. - 541 s.

Поступила 14.05.2013

Гонтарь Юлия Григорьевна  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 7076010, e-mail: gontar\_yulia@mail.ru

Лавинский Денис Владимирович, к.т.н., доц.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра теоретической механики  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

Gontar Y.G., Lavinsky D.V.  
**Effect of electric field strength on surface layer destruction in insulation construction.**  
Results of theoretical and experimental studies of surface layer destruction in electrical insulation under lightning surge pulses are given, their impact on the insulation construction durability shown. Causes of water treeing in the surface layers of polymer insulation are analyzed.  
**Key words – water treeing, space charge, ionization, surface destruction, surface activation, field electron emission, field inhomogeneity.**

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРОВОДА ПЭЭИДХ – 0,63

*Виконано аналіз результатів контролю напруги пробою емальпроводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів.*

*Выполнен анализ результатов контроля напряжения пробоя эмальпровода с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров.*

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Эмальпровод с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров – один из наиболее современных инновационных продуктов отечественного производства проводов для обмоток электрических машин и аппаратов. Достигнутый для этих проводов уровень электрической прочности эмальизоляции соответствует мировым стандартам. И главной технологической проблемой при освоении такой продукции является минимизация дисперсии значений пробивного напряжения  $U_{\text{пр}}$  (далее  $U$ ), что требует применения статистических методов контроля дисперсии этого параметра.

Изоляция провода ПЭЭИДХ является многослойной, состоящей, например, из десяти слоев полиефиримидного полимера (ПЭИ) и четырех слоев полиамидимидного полимера (ПАИ). Двухслойной ее называют условно, поскольку она состоит из двух различных полимерных материалов. Особенностью слоистой изоляции при внесении в электрическое поле является присущий именно ей переходной процесс накопления слабо связанных зарядов диэлектрика на границе раздела материалов с различными электрофизическими характеристиками. Этот процесс (миграционная поляризация) обусловливает протекание через изоляцию дополнительного тока. Ток миграционной поляризации медленнее, чем другие поляризационные токи, спадает во времени, и, во-вторых, на него сильно влияют технологические факторы, например, степень полимеризации, наличие остатков растворителя и т.п. Поэтому учет миграционных токов необходим при проведении электрических испытаний изоляции и при анализе формирования электрофизических параметров изоляции в процессе эмалирования.

### АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

Расчетные соотношения для электрофизических характеристик двухслойного диэлектрика в однородном электрическом поле известны [1], они использованы при анализе тока через двухслойную изоляцию эмальпроводов в [2].

Два фактора не позволяют использовать эти решения непосредственно:

1) Провод ПЭЭИДХ – 0,63 относится к той части серии проводов ПЭЭИДХ, которая характеризуется сравнительно большими значениями диаметра проволоки и диаметральной толщины изоляции. Поэтому допущение в [1] об одинаковой площади поперечного сечения слоев диэлектрика с различными электрофи-

зическими свойствами для них неверно, а влияние этого различия на характеристики готового провода, как минимум, требует проверки.

2) Для поставленной задачи, а именно, – исследования связи вида и размеров дефектов поверхности медного проводника с напряжением пробоя  $U_{\text{пр}}$  эмалевого покрытия, целесообразно оценить такую связь в процессе нанесения слоев эмали. Очевидно, что влияние вида и размеров дефектов поверхности медного проводника на напряжение пробоя  $U_{\text{пр}}$  сильно зависит от толщины и свойств слоя эмали. Чтобы учесть последнее обстоятельство необходима модель, позволяющая учесть, как минимум, три слоя эмали с различными электрофизическими свойствами.

**Цель работы** – разработка модели слоистого диэлектрика эмальпровода ПЭЭИДХ, учитывающей неоднородность электрического поля и наличие трех слоев диэлектрика с различными электрофизическими свойствами.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходные положения модели:

1) Электрическое поле в слоях диэлектрика радиальное. То есть силовые линии поля перпендикулярны границам раздела диэлектриков с различными электрофизическими свойствами. Следовательно, возможное преломление силовых линий поля на границе раздела сред, например из-за эксцентриситета эмалевого покрытия, не учитывается.

2) Диэлектрик в пределах одного слоя однородный. Следовательно, влияние неоднородностей в пределах одного слоя диэлектрика, которое может быть весьма существенным для эмали после прохождения первых калибров маршрута, в данной модели не учитывается.

Таким образом, общее в известной [1] и предложенной моделях следующее:

1) Диэлектрик в пределах одного слоя однородный.

2) Возможное преломление силовых линий поля на границе раздела сред не учитывается.

3) Емкость и сопротивление в каждом слое диэлектрика соединены параллельно, а слои диэлектрика с различными электрофизическими свойствами соединены последовательно. Соответственно исходные соотношения для плотности тока через слой диэлектрика и разности потенциалов, к нему приложенной:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot E_i + \varepsilon_i \cdot \frac{dE_i}{dt} = 0; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n U_i = U; \quad (2)$$

где  $n$  – количество слоев диэлектрика;  $\varepsilon_i$ ,  $\gamma_i$  – диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость  $i$ -го слоя;  $E_i$ ,  $U_i$  – напряженность электрического поля и напряжение для  $i$ -го слоя;  $t$  – время от момента включения постоянного напряжения.

Если для двух соседних слоев отношение диэлектрических проницаемостей слоев  $\varepsilon_2/\varepsilon_1$  не равно отношению удельных проводимостей соответствующих слоев  $\gamma_2/\gamma_1$ , то плотности токов утечки в соседних слоях неодинаковы, что приводит к накоплению свободных зарядов на границе между слоями.

Создание заряда на границе между слоями связано с появлением соответствующего зарядного тока, определяющегося скоростью переходного процесса. Характеристикой длительности переходного процесса является время релаксации миграционной поляризации  $\tau$ .

Решение системы уравнений (1) и (2) для двухслойной изоляции в однородном электрическом поле и одинаковой площади поперечного сечения слоев известно и для времени релаксации миграционной поляризации  $\tau$  составляет:

$$\tau = (d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1) / (d_1 \gamma_2 + d_2 \gamma_1). \quad (3)$$

Это соотношение использовано нами для проверки приемлемости представления изоляции эмаль-проводка ПЭЭИДХ2-200 в виде двухслойного плоского диэлектрика. Отличие электрического поля в двухслойной эмальизоляции от плоского (модель (3)) в том, что это радиальное поле и площади поперечного сечения соседних слоев различны. Особенno существенно это различие для провода ПЭЭИДХ2-200, в котором толщины слоев основного и покровного лаков значительно отличаются друг от друга. Причем указанное различие изменяется в процессе эмалирования.

Для этого система уравнений (1), (2) записана для двух слоев изоляции с различными электрофизическими характеристиками в радиальном электрическом поле:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_1 \cdot E_1 + \varepsilon_1 \cdot \frac{\partial E_1}{\partial t} = \gamma_2 \cdot E_2 + \varepsilon_2 \cdot \frac{\partial E_2}{\partial t}; \\ U = E_1 \cdot r \cdot \ln[(r+d_1)/r] + E_2 \cdot (r+d_1) \times \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\times \ln[(r+d_1+d_2)/(r+d_1)]; \quad (5)$$

где  $E_1$ ,  $E_2$  – максимальные напряженности электрического поля в первом и втором слоях эмальизоляции;  $\gamma_1$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\varepsilon_2$  – удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость, соответственно, первого и второго слоев эмальизоляции;  $r$  – радиус медного проводника;  $d_1$ ,  $d_2$  – толщина, соответственно, первого и второго слоев эмальизоляции;  $U$ ,  $t$  – напряжение и время от момента включения напряжения.

Система уравнений (4), (5) приводит к дифференциальному уравнению относительно максимальной напряженности электрического поля  $E_1$  в первом слое:

$$\begin{aligned} \partial E_1 / \partial t \cdot \{ \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot [r \cdot \ln[(r+d_1)/r]/(r+d_1) \times \\ \times \ln[(r+d_1+d_2)/(r+d_1)]] + \\ + E_1 \cdot \{ \gamma_1 + \gamma_2 \cdot [r \cdot \ln[(r+d_1)/r]/(r+d_1) \times \\ \times \ln[(r+d_1+d_2)/(r+d_1)]] \} = \\ = \gamma_2 \cdot U/(r+d_1) \cdot \ln[(r+d_1+d_2)/(r+d_1)]. \end{aligned} \quad (6)$$

откуда время релаксации миграционной поляризации  $\tau$  для двухслойной изоляции с различными электрофизическими характеристиками в радиальном электрическом поле:

$$\begin{aligned} \tau = \{ \varepsilon_1 \cdot (r+d_1) \cdot \ln[(r+d_1+d_2)/(r+d_1)] + \\ + \varepsilon_2 \cdot [r \cdot \ln[(r+d_1)/r]] \} / \{ \gamma_1 \cdot (r+d_1) \times \\ \times \ln[(r+d_1+d_2)/(r+d_1)] + \gamma_2 \cdot [r \cdot \ln[(r+d_1)/r]] \}. \end{aligned} \quad (7)$$

Очевидно, что формулы (3) и (7) дают практически одинаковые результаты в тех случаях, когда в радиальном и плоском электрических полях площади поперечного сечения соседних слоев отличаются незначительно или различие соотношения площадей и электрофизических характеристик компенсируют друг друга. Это иллюстрирует рис. 1, на котором приведены значения относительной погрешности при расчете с помощью (3) при нанесении основного лака (ПАИ). Такая погрешность не превышает минус 0,5 %.

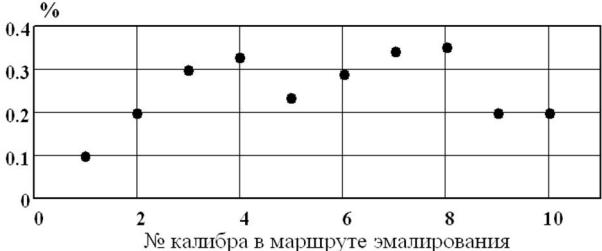


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности при расчете времени релаксации миграционной поляризации  $\tau$  с помощью (3) при нанесении основного лака (ПАИ) для провода ПЭЭИДХ2 – 200 – 0,63 в процессе эмалирования

Для готового провода ПЭЭИДХ2 – 200 – 0,63 (основной и покровный лак, полностью полимеризованные) относительной погрешности при расчете времени релаксации миграционной поляризации  $\tau$  с помощью (3) значительно больше и составляет минус 7 %. Таким образом, при расчете  $\tau$  для проводов с двойной эмальизоляцией следует использовать соотношение (7). Очевидно, что погрешность растет с увеличением диаметра провода. Это означает недоценку величины тока через изоляцию в процессе высоковольтных испытаний постоянным напряжением на проход.

Для анализа изменения свойств слоя эмали в течение маршрута эмалирования необходима модель, позволяющая учесть, как минимум, три слоя эмали с различными электрофизическими свойствами. Для определения времени релаксации миграционной поляризации  $\tau$  решением системы двух уравнений (1) и (2) для трех слоев можно использовать известное соотношение [3]:

$$\sum d_i / \gamma_i \cdot (1 - \varepsilon_i / \gamma_i \cdot \tau) = 0, \quad i \in \{1, 2, 3\}. \quad (8)$$

Подобные уравнения можно составить для произвольного количества слоев эмали, если это технически целесообразно.

Из (8) определены расчетные значения  $\tau$  эмальизоляции после калибров маршрута, на которых нано-

сится покровный лак (№ 11 – № 14). На рис. 2 приведены результаты расчета времени релаксации миграционной поляризации  $\tau$  в процессе эмалирования для провода ПЭИДХ2 – 200 – 0,63 с помощью (7) (калибры № 2 – № 10) и (8) (калибры № 11 – № 14  $\epsilon_3/\epsilon_0 = 5$ ;  $\gamma_3 = 10^{-9}$  См/м). На график нанесено произведение емкости изоляции на ее сопротивление после прохождения первого калибра (однослойная изоляция).

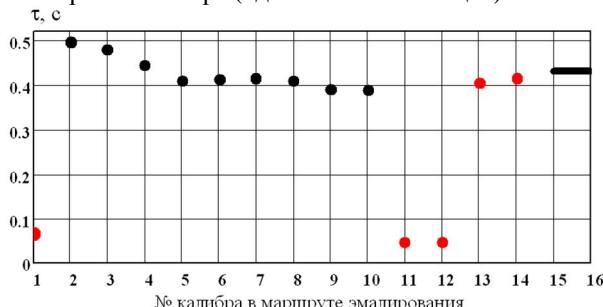


Рис. 2. Зависимость времени релаксации миграционной поляризации  $\tau$  для провода ПЭИДХ2 – 200 – 0,63 в процессе эмалирования: № 1 – измеренное значение  $RC$  после первого калибра; № 2 – № 10 нанесение полиэфиримидного полимера (ПЭИ):  $\epsilon_1/\epsilon_0 = 3,5$ ;  $\gamma_1 = 10^{-12}$  См/м; № 11 – № 14 нанесение полиамидимидного полимера (ПАИ):  $\epsilon_2/\epsilon_0 = 4,2$ ;  $\gamma_2 = 10^{-10}$  См/м; прямая – значение  $\tau$  для готового провода

Динамика изменения времени релаксации миграционной поляризации отражает изменение электрофизических свойств изоляции в процессе эмалирования. По мере нанесения основного лака (ПЭИ) с высокими электроизоляционными свойствами, время релаксации остается высоким, постепенно снижаясь за счет нанесения слоев лака, содержащих остатки растворителя и недостаточно полимеризованных. После нанесения покровного лака (ПАИ) с менее высокими электроизоляционными свойствами, время релаксации резко снижается (несколько сотых долей секунды) и повышается за счет полимеризации покровного лака и соответственно повышения его электроизоляционных свойств.

Резкое повышение после калибра № 12 почти до уровня, характерного для готового провода свидетельствует о формировании границы раздела между двумя используемыми полимерами по мере полимеризации покровного лака. Роль границы раздела заключается в перераспределении зарядов в течение переходного процесса миграционной (междуслойной) поляризации между двумя слоями. На этой границе раздела различие между электроизоляционными свойствами соседних слоев наибольшее.

## ВЫВОДЫ

На основе разработанной модели изменения электрофизических параметров изоляции в процессе эмалирования выполнен общий анализ динамики изменения  $\tau$  в течение процесса эмалирования провода ПЭИДХ2-200 – 0,63. При этом принято, что слой лака, нанесенный последним, существенно отличается по электрофизическим характеристикам от предыдущих слоев, которые принимаем полностью отверженными. Очевидно, что на самом деле отверждение

эмальлака происходит в течение всего маршрута и электрофизические параметры изменяются постепенно. Поэтому принятые в этих расчетах электрофизические параметры материалов с помощью предложенной модели могут быть проверены экспериментально. Это позволит:

1) Оценить уровень тока через изоляцию при испытаниях высоким постоянным напряжением на проход, поскольку значение  $\tau$  является параметром известной экспоненциальной модели для тока миграционной поляризации.

2) Оценить влияние электрофизических свойств используемых при нанесении двухслойной изоляции полимеров на электрофизические параметры провода.

3) Оценить оптимальные параметры испытаний высоким постоянным напряжением на проход, которые для провода ПЭИДХ2 являются основными неразрушающими испытаниями в процессе технологии его изготовления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сканави Г.И. Физика диэлектриков / Сканави Г.И. – М.: Физматиздат, 1958. – 908 с.
2. Голик О.В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной эмальизоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход / О.В. Голик // Український метрологічний журнал. – Харків, 2009. – № 1. – С. 12-17.
3. Харитонов Е.В. Диэлектрические материалы с неоднородной структурой. / Харитонов Е.В. – М.: Радио и связь, 1983. – 127 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Skanavi G.I. Fizika di'elektrikov / Skanavi G.I. - M.: Fizmatizdat, 1958. - 908 s. 2. Golik O.V. Issledovanie defektnosti nagrevostojkikh provodov s dvojnoj poliimidnoj 'emal'izolyacijei pri ispytaniyah vysokim napryazheniem na prohod / O.V. Golik // Ukrains'kij metrologichnij zhurnal. - Harkiv, 2009. - № 1. – S. 12-17. 3. Haritonov E.V. Di'elektricheskie materialy s neodnorodnoj strukturoj. / Haritonov E.V. – M.: Radio i svyaz', 1983. - 127 s.

Поступила 11.05.2013

Гурин Анатолий Григорьевич, д.т.н., проф., Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" кафедра "Электроизоляционной и кабельной техники" 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21 тел. (057) 7076663, e-mail: AGurin@kpi.kharkov.ua

Антонец С.Ю.

Публичное акционерное общество "Завод Южкабель" 61099, Харьков, ул. Автогенная, 7 тел.(057) 7545248 e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Gurin A.G., Antonets S.Yu.

**Experimental research on dielectric strength of PEEIDH-0.63 wire.**

Monitoring data on the breakdown voltage of an enameled wire with double polyimide interpolymer insulation are analyzed.

**Key words – experimental research, enameled insulated wire, dielectric strength, voltage monitoring.**

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ СШИВКИ ПОЛИЭТИЛЕНА

*В статті розглянуто можливість застосування імпульсно-періодичних потужнострумових індукційних прискорювачів електронів для радіаційної шивки поліетилену. Проведено порівняльний аналіз з іншими пристроями для опромінення, що застосовуються.*

*В статье рассмотрена возможность применения импульсно-периодических сильноточных индукционных ускорителей электронов для радиационной сшивки полиэтилена. Проведен сравнительный анализ с другими применяемыми устройствами для облучения.*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время радиационная технология находит все более широкое применение в промышленности. В общем виде под этим термином подразумевается воздействие на вещество излучениями высокой энергии с целью изменения его свойств. Основным физическим явлением, используемым при этом, является неупругое рассеяние быстрых электронов или квантов электромагнитного излучения в обрабатываемом объекте, при котором в нем образуется большое число вторичных электронов низкой энергии, происходит ионизация и возбуждение атомов, разрыв молекулярных связей, образование высокоактивных свободных радикалов и т.п. Образовавшиеся частицы — инициаторы разнообразных химических реакций, вызывающих требуемые изменения свойств облучаемого объекта; сшивку полимеров, полимеризацию мономеров, прививку молекул одного вещества к другому, деструкцию, синтез новых соединений и т.д. В радиационной технологии можно получать многие материалы с лучшими, а иногда и с качественно новыми свойствами. Одно из таких направлений — радиационная модификация полиэтилена электронным пучком, при которой происходит сшивка его молекул, т.е. образование поперечных связей между ними. Это приводит к значительному повышению прочности и термостойкости облучаемых изделий. Провода и кабели с такой изоляцией могут эксплуатироваться при более высоких температурах и токовых нагрузках, в сложных условиях, где ранее использовались провода и кабели с дорогостоящей изоляцией из фторопласта [1].

Всё большее внимание в настоящее время уделяется производству и исследованиям полимерных материалов, основу которых составляют термопласты. Наиболее распространеными термопластами являются полиолефины, которые занимают ведущее место в мировом производстве полимерных труб и фасонных изделий к ним, и их выпуск ежегодно увеличивается. Полиэтилены, полипропилены, поливинилхлориды и другие полимеры обладают рядом ценных свойств, таких как низкая плотность, влагопоглощение и газопроницаемость, высокие диэлектрические показатели и химическая стойкость, что позволяет широко использовать трубы и фасонные изделия из этих полимеров в строительной промышленности, в нефтегазовом комплексе, коммунальном хозяйстве, в первую очередь в водоснабжении и для отопления.

В последние годы наблюдается неуклонный рост заинтересованности в использовании полимерных трубопроводов вместо металлических, что связано с рядом их преимуществ. В процессе эксплуатации металлические трубопроводы подвергаются сильной коррозии из-за повышенной влажности, кислотности грунтов, высоких температур, что требует значительных затрат на их изоляцию и замену. В России, в ближайшие годы, по данным исследований НПП "Маяк 93", предстоит поменять 3 млн. км металлических труб, и лучшими заменителями могут быть рекомендованы полимерные трубы с использованием радиационно-модифицированного полиэтилена [2].

### 1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

В настоящее время для радиационной модификации наиболее широко применяются электронные пучки, генерируемые высоковольтными ускорителями постоянного тока и резонансными ускорителями. Сравнение экономических и энергетических характеристик этих ускорителей с характеристиками импульсно-периодических сильноточных индукционных ускорителей (табл. 1) [3] делает привлекательным рассмотрение возможности применения последних в радиационной технологии.

Таблица 1

Параметры различных типов ускорителей

Параметр	Ускоритель пост. тока	Резонанс. ускоритель	Индукц. ускоритель
КПД, %	70-90	<25	50-80
Цена, долл./Вт	10-20	80-200	4-20

Также привлекательным проведение такого анализа делает тот факт, что в настоящее время в технике достигнут прогресс по нескольким направлениям:

1) разработаны высоковольтные сильноточные тиратроны нового типа (ТПИ) с малым фронтом коммутации (на уровне 10 нс), способные работать с высокой рабочей частотой посылок импульсов и обладающие большим сроком службы [4], что сделало возможным разработку на их основе импульсно-периодических высоковольтных сильноточных модуляторов большой средней мощности в наносекундном диапазоне длительностей импульсов, характерном для ускорителей индукционного типа;

2) разработаны сильноточные взрывоэмиссионные катоды с большим сроком службы [5-9];

3) разработан механически прочный и нагревостойкий композиционный материал, из которого стало возможным изготовление выпускных окон с большой рабочей площадью, позволяющей выводить в обрабатываемую среду пучки электронов большой средней мощности (вплоть до мегаваттного уровня) [10, 11].

В диапазоне промышленно освоенных в настоящее время для радиационной технологии энергий электронного пучка 0,4-4 МэВ средняя мощность большинства существующих резонансных ускорителей находится в диапазоне до 100 кВт, ускорителей постоянного тока – до 200 кВт. Индукционные ускорители не имеют ограничений по максимально достижимой средней мощности пучка во всём диапазоне энергий вплоть до мегаваттного уровня.

Особенностью большинства применяемых в настоящее время высоковольтных ускорителей постоянного тока и резонансных ускорителей является наличие в их конструкции протяженного линейного ускорительного тракта, в конце которого расположено "щелевое" выпускное окно, через которое "сканирующий" пучок выводится в атмосферу. Из-за одностороннего выведения пучка возникает необходимость в применении специальных устройств для всестороннего однородного облучения изделия, если оно имеет осесимметричную форму и большой диаметр, что достигается различными способами [12]: многократным проведением облучаемого изделия мимо выпускного окна после прохождения поворотных валиков; вращением самого облучаемого изделия вокруг своей оси при его движении вдоль выпускного окна; применением нескольких облучающих устройств, размещенных под разными углами; поворотом электронного пучка, выведенного в атмосферу, в сторону облучаемого изделия сопровождающим магнитным полем. Недостатком некоторых таких устройств является наличие неиспользуемых зон облучения ("просветов") и в некоторых случаях увеличенной длины пробега электронов в воздухе. Это приводит к дополнительным ионизационным потерям электронного пучка в атмосфере, что дополнительно снижает энергоэффективность облучающего устройства.

Достоинством ускорителя индукционного типа является то, что он может быть выполнен однозazorным, нагруженным на осесимметричный взрывоэмиссионный ножевой катод, если секция ускорителя выполнена крупносекционированной, в виде линейного импульсного трансформатора (рис. 1) [13, 14]. В таком ускорителе нет линейного вакуумного ускорительного тракта. Это даёт возможность создания устройств для всестороннего однородного по поверхности облучения осесимметричного изделия большого диаметра электронным пучком за один проход без необходимости применения дополнительных поворотных механизмов. При этом пучок, выведенный в атмосферу в любой области выпускного окна, будет направлен в обрабатываемое изделие, то есть в таком устройстве не будет неиспользуемых зон облучения, что обеспечит наилучшее использование электронного пучка, а, следовательно, и наилучшую энергоэффективность облучающего устройства.

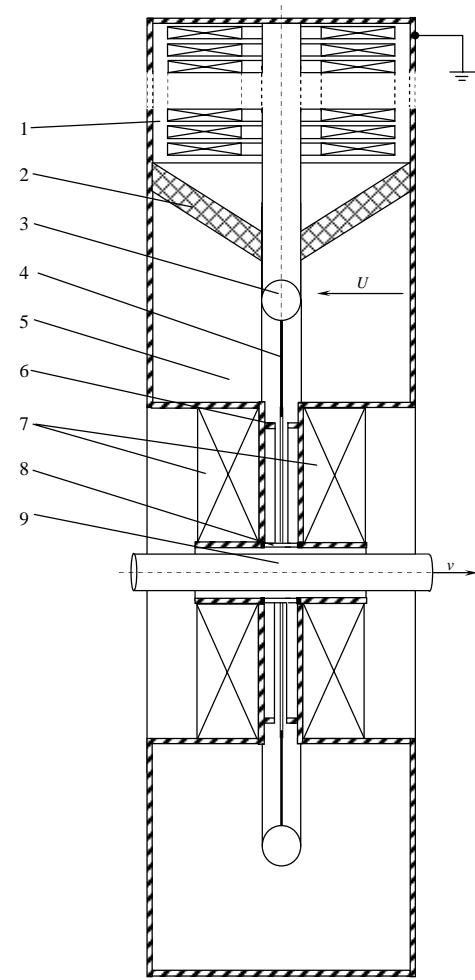


Рис. 1. Упрощенная компоновочная схема облучающего устройства на основе индукционного ускорителя: 1 – секция индукционного ускорителя; 2 – вакуумный изолятор; 3 – торoidalный экран ножевого катода, подключенного к центральному электроду секции ускорителя; 4 – ножевой осесимметричный взрывоэмиссионный катод; 5 – вакуумная ускорительная камера; 6 – анодная диафрагма; 7 – катушки сопровождающего магнитного поля; 8 – трубчатое окно вывода пучка из вакуума в атмосферу; 9 – облучаемое осесимметричное изделие

## 2. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ СШИВКИ ПОЛИЭТИЛЕНА

При облучении вещество нагревается, а сильноточный индукционный ускоритель способен ввести в обрабатываемое изделие требуемые дозы облучения за время, существенно меньшее времени охлаждения материала. Для определения предельно допустимой дозы облучения за один проход с точки зрения тепловой нагрузки была рассчитана зависимость нагрева полиэтилена от поглощенной дозы во всём диапазоне промышленно применяемых в настоящее время доз облучения полиэтилена (от 50 до 300 кГр) (рис. 2). Расчет показал, что при максимально допустимой величине нагрева 65 градусов (принятой из условия не довести до температуры плавления ещё не сшитый полиэтилен при температуре окружающей среды 40°C) предельно допустимая доза облучения составила  $D_{max}=150$  кГр.

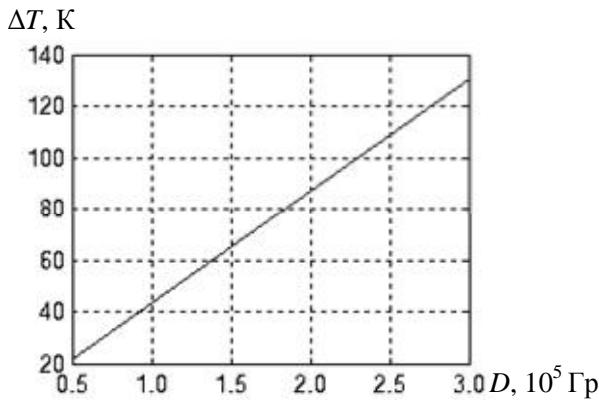


Рис. 2. Нагрев полиэтилена в зависимости от величины "мгновенно" введенной дозы облучения  $\Delta T = D/c$  ( $c = 2300 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  – теплоёмкость полиэтилена)

На рис. 3 представлена зависимость оптимальной глубины проникновения электронов в полиэтилен от энергии электронов  $\delta(E)$  в диапазоне энергий 0,4-4 МэВ, рассчитанная по [1] для усредненной величины плотности полиэтилена  $\rho = 0,943 \text{ г}/\text{см}^3$ . Оптимальная глубина проникновения электронов в полиэтилен низкой и высокой плотности отличается от рассчитанной зависимости не более чем на  $\pm 3\%$ .

Для полученного диапазона глубин проникновения и характерного для таких толщин полиэтилена диапазона внешних диаметров выпускаемых промышленностью изолированных проводов и водопроводных полиэтиленовых труб был проведен расчет количества импульсов, требуемого для введения в полиэтилен дозы  $D_{max}$  (рис. 4). Расчет был произведен по формуле:

$$n(d, \delta) = \pi \cdot (d - \delta(E)) \cdot l \cdot \delta(E) \cdot \rho \cdot D_{max} / (I_n \cdot \tau \cdot E/e), \quad (1)$$

здесь  $d$  – наружный диаметр обрабатываемого изделия;  $l = 30 \text{ см}$  – расчетная осевая длина зоны облучения (принята из конструкторских соображений);  $I_n = 8 \text{ кА}$  – величина тока пучка электронов в импульсе;  $\tau = 100 \text{ нс}$  – длительность ускоряющих импульсов;  $E$  – энергия электронов,  $e$  – заряд электрона. Величины  $I_n$  и  $\tau$  были заданы из условия обеспечить рассчитанный по [15] КПД индукционного ускорителя на уровне 70-80 % при использовании в качестве ферромагнетика сплава 50 НП 10 мкм (габариты индукционной системы взяты из проектируемой конструкции).

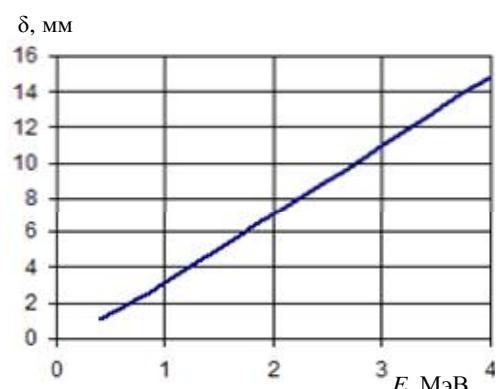


Рис. 3. Зависимость оптимальной глубины проникновения электронов в полиэтилен от энергии электронов

Расчет показал, что сильноточные индукционные ускорители наиболее применимы во всём диапазоне обрабатываемых толщин при диаметрах облучаемого изделия начиная примерно с 30 мм и более. При диаметрах изделий на уровне единиц миллиметров введение пучка даже при одной только посылке способно ввести в изделие дозу, значительно превышающую 150 кГр, что может привести к расплавлению полиэтилена. Наилучшим с точки зрения наименьшей скорости нагрева и возможности широкого регулирования мощности дозы является использование сильноточного индукционного ускорителя для облучения изделий наибольших диаметров.

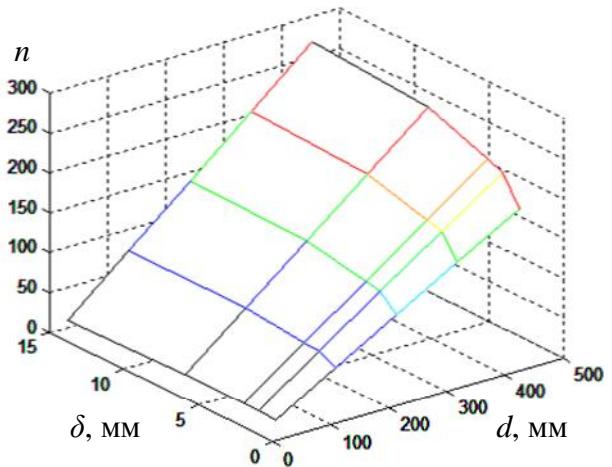


Рис. 4. Количество посылок ускоряющих импульсов, требуемое для введения в полиэтилен дозы 150 кГр, в зависимости от толщины стенки и внешнего диаметра облучаемого изделия

На рис. 5 представлены рассчитанные зависимости средней мощности пучка от энергии электронов  $P_{cp}(E)$  (а), производительность облучающей установки в зависимости от средней мощности пучка электронов, введенного в полиэтилен  $P_{fact}(P_{cp})$  (б) и скорость движения облучаемого изделия мимо выходного окна в зависимости от толщины и наружного диаметра облучаемого изделия  $v(\delta, d)$  (в) при частоте посылок ускоряющих импульсов  $f_n = 125 \text{ Гц}$  (принятой исходя из номинальных данных для тиратронов типа ТПИ1-10к/50). При расчете использовались следующие соотношения:

$$P_{cp}(E) = I_n \cdot \tau \cdot f_n \cdot E/e, \quad (2)$$

$$P_{fact}(P_{cp}) = P_{cp}/D_{max}, \quad (3)$$

$$v(\delta, d) = l \cdot f_n / n(d, \delta). \quad (4)$$

В расчетах было принято приближенное допущение, что вся введенная в полиэтилен энергия поглощается на оптимальной глубине проникновения. В реальности небольшая остаточная часть энергии пучка расходуется на несколько большей глубине.

Расчеты показали, что скорость движения облучаемого изделия  $v$  в рассмотренном диапазоне параметров варьируется от 8 до 240 м/мин, и тем больше, чем меньше диаметр облучаемого изделия.

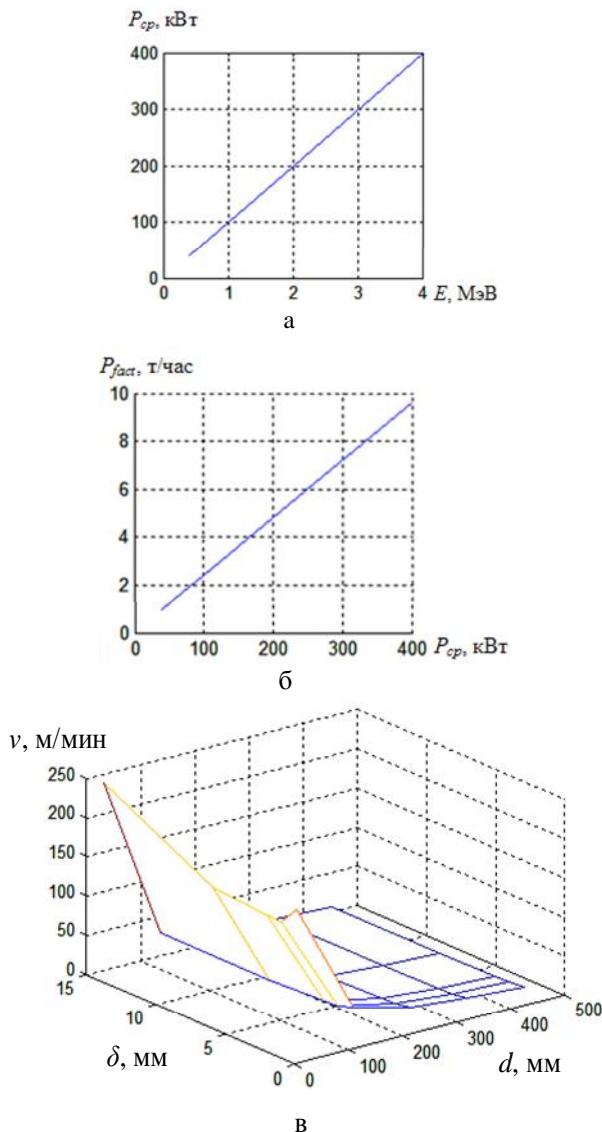


Рис. 5 Зависимости: средняя мощность пучка от энергии электронов (а); производительность от средней мощности пучка (б); скорость движения обрабатываемого изделия мимо выпускного окна в зависимости от габаритов облучаемого изделия (в)

Следует отметить, что в настоящее время слабо изучены процессы в полиэтилене, происходящие при средних мощностях дозы, значительно превышающих 10 кГр/с [1]. Рассчитанная для нашего случая минимальная средняя мощность дозы превышает эту величину в 7 раз, а максимальная – примерно в 200 раз (рис. 6). Расчет был произведен по формуле:

$$P_D(\delta, d) = D_{max} \cdot f_n / n(\delta, d). \quad (5)$$

Индукционные ускорители позволяют плавно регулировать частоту посылок ускоряющих импульсов, и соответственно, и среднюю мощность дозы, что позволяет снизить среднюю мощность дозы до приемлемого уровня. Однако снижение мощности дозы снижает и производительность, поэтому целесообразно провести исследования, которые позволили бы найти максимально допустимую мощность дозы с целью обеспечения максимально возможной производительности.

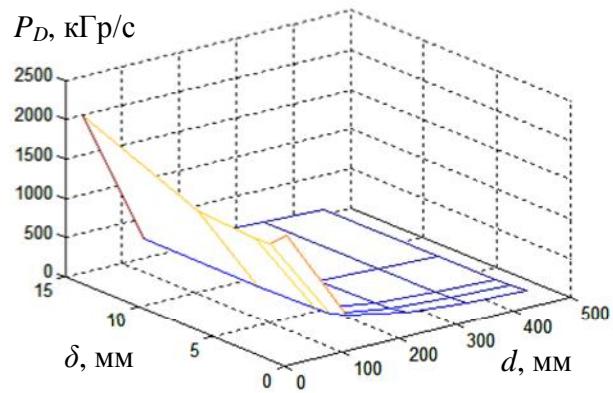


Рис. 6. Зависимость средней мощности вводимой дозы от толщины облучаемой стенки и наружного диаметра изделия

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в данной работе аналитические исследования показывают, что импульсно-периодические сильноточные индукционные ускорители электронов перспективны для радиационной сшивки полиэтилена, особенно для производства изделий больших диаметров.

Поскольку мощность дозы, вводимая индукционными ускорителями, может существенно превосходить мощности дозы, достижимые на ускорителях других типов – для обеспечения максимальной производительности целесообразно провести исследования, направленные на определение предельно допустимых мощностей дозы, вводимых в полиэтилен при использовании сильноточных индукционных ускорителей. Величины предельно допустимой мощности дозы, требуемой поглощенной дозы, планируемой производительности и габаритов облучаемого изделия являются основополагающими при разработке линейного индукционного ускорителя для промышленных целей и окна вывода пучка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Свинын М.П. Расчет и проектирование высоковольтных ускорителей электронов для радиационной технологии. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 144 с.
- Шлапацкая В.В. Полимерные трубопроводы во внутренних системах центрального отопления и водоснабжения Часть 2. / Шлапацкая В.В., Ильенко Р.Е. // Журнал С.О.К. Сантехника. Отопление. Кондиционирование 17.03.2005: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/64/>. (Дата обращения: 27.04.2013).
- R.J. Adler. Comparison of DC and Pulsed Beams for Commercial Applications // 10<sup>th</sup> International Conference on High Power Particle Beams. June 20-24, 1994, San Diego, CA. P. 29-32.
- Тиатроны с холодным катодом – псевдоискровые разрядники: [Электронный ресурс] // Pulsed Technologies LTD 2004-2013. URL: [http://www.pulse-tech.ru/tpi-series\\_rus.htm](http://www.pulse-tech.ru/tpi-series_rus.htm). (Дата обращения: 27.04.2013).
- Литвинов Е.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы при вакуумных разрядах / Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. // УФН. – Т. 139. – № 2. – 1983. – С. 269-302.
- Месяц Г.А. Импульсный электрический разряд в вакууме / Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. // Новосибирск. Наука, 1984. – 242 с.
- Бугаев С.П. Получение интенсивных микросекундных рентгеновских пучков / Бугаев С.П. Кассиров Г.С., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. // Письма в ЖЭТФ, т. 18, 1973, С. 21-26.

8. Joda G.R. A repetitively pulsed electron beam generator. / Joda G.R., Meskaw D.A. // "Proceeding 2 International topical conference on hidh power electron and ion research and technoloody". Cornel. 1977, P. 252-273.
9. Бугаев С.П. Электронные пучки большого сечения / Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Шанин П.М. // М. Энергоиздат, 1984. – 232 с.
10. O.F. Kovpik. Carbon-Carbon Windows, Intended For Extraction Of Electron And Proton Beams From Accelerators Into Atmosphere. / O.F. Kovpik, E.A. Kornilov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Kolosenko, and other. // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования" (42). №1. – ННЦ "ХФТИ". – 2004. – С. 77-79.
11. Антіпов В.С. Перспективний комплекс для використання радіаційних технологій у промисловості, заснований на використанні потужного електронного пучка індукційного прискорювача з вікном виведення з вуглець – вуглецевого композиційного матеріалу. / Антіпов В.С., Бабіч Є.М., Єгоров О.М., Ковпік О.Ф., Корнілов Є.О., Колосенко В.В., Кисельов В.А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования" (59). – № 4(80). – 2012. – С. 194-198.
12. Финкель Э.Э. и др. Технология производства проводов и кабелей с облученной изоляцией: состояние и перспективы // Кабельная техника. – 1997. – № 12, 13.
13. Гурин А.Г. Баланс энергии в высоконергетичном линейном индукционном ускорителе. / Гурин А.Г., Ложкин Р.С. // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 1. – С. 83-85.
14. Патент 60975 UA, МПК (2011.01) G21K 5/00 G01K 1/08 (2006.01) G21K 1/093 (2006.01). Пристрій для опромінення ізоляційних матеріалів електронним пучком. / Гурин А.Г., Ложкин Р.С., Корнілов Є.О., Федорівська О.В. Вінокуров В.О., Гурін В.А., Колосенко В.В.; НТУ "ХПІ", u201011014; Заяв. 13.09.2011; Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.
15. Вахрушин Ю. П., Анацкий А. И. Линейные индукционные ускорители. – М.: Атомиздат, 1978. – 248 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Svin'in M.P. Raschet i proektirovanie vysokovol'tnyh uskoritelej `elektronov dlya radiacionnoj tehnologii. - M.: `Energoatomizdat, 1989. - 144 s. 2. Shlapackaya V.V. Polimernye truboprovody vo vnutrennih sistemah central'nogo otopleniya i vodosnabzheniya Chast' 2. / Shlapackaya V.V., Il'enko R.E. // Zhurnal S.O.K. Sanstehnika. Otoplenie. Kondicionirovanie 17.03.2005: [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/64/>. (Data obrascheniya: 27.04.2013). 3. R.J. Adler. Comparison of DC and Pulsed Beams for Commercial Applications // 10<sup>th</sup> International Conference on High Power Particle Beams. June 20-24, 1994, San Diego, CA. P. 29-32. 4. Tiratrony s holodnym katodom - psevdooiskrovye razryadniki: [Elektronnyj resurs] // Pulsed Technologies LTD 2004-2013. URL: [http://www.pulse-tech.ru/tpi-series\\_rus.htm](http://www.pulse-tech.ru/tpi-series_rus.htm). (Data obrascheniya: 27.04.2013). 5. Litvinov E.A. Avto`emissionnye i vzryvnye processy pri vakuumnyh razryadah / Litvinov E.A., Mesyac G.A., Proskurovskij D.I. // UFN. - T. 139. - № 2. - 1983. - S. 269-302. 6. Mesyac G.A. Impul'snyj `elektricheskij razryad v vakuume / Mesyac G.A., Proskurovskij D.I. // Novosibirsk. Nauka, 1984. - 242 s. 7. Bugaev S.P. Poluchenie intensivnyh mikrosekundnyh rentgenovskih puchkov / Bugaev S.P. Kassirov G.S., Ko

val'chuk B.M., Mesyac G.A. // Pis'ma v ZhETF, t. 18, 1973, S. 21-26. 8. Joda G.R. A repetitively pulsed electron beam generator. / Joda G.R., Meskaw D.A. // "Proceeding 2 International topical conference on hidh power electron and ion research and technoloody". Cornel. 1977, P. 252-273. 9. Bugaev S.P. `Elektronnye puchki bol'shogo secheniya / Bugaev S.P., Krejndel' Yu.E., Shanin P.M. // M. `Energoizdat, 1984. - 232 s. 10. O.F. Kovpik. Carbon-Carbon Windows, Intended For Extraction Of Electron And Proton Beams From Accelerators Into Atmosphere. / O.F. Kovpik, E.A. Kornilov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Kolosenko, and other. // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Seriya "Yaderno-fizicheskie issledovaniya" (42). №1. - NNC "HFTI". - 2004. - S. 77-79. 11. Antipov V.S. Perspektivnij kompleks dlya vikoristannya radiacijnih tehnologij u promislovosti, zasnovanij na vikoristanni potuzhnogo elektronnogo puchka indukcijnogo priskoryuvacha z viknom vivedennya z vuglec' - vuglecevogo kompozicijnogo materialu. / Antipov V.S., Babich C.M., Egorov O.M., Kovpik O.F., Kornilov C.O., Kolosenko V.V., Kisel'ov V.A. // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Seriya "Yaderno-fizicheskie issledovaniya" (59). - № 4(80). - 2012. - S. 194-198. 12. Finkel' E.E. i dr. Tehnologiya proizvodstva provodov i kablej s obluchennoj izolyacijej: sostoyanie i perspektivy // Kabel'naya tehnika. - 1997. - № 12, 13. 13. Gurin A.G. Balans `energii v vysoko`energetichnom linejnem indukcionnom uskoritele. / Gurin A.G., Lozhkin R.S. // Elektrotehnika i elektromekhanika. - 2005. - № 1. - S. 83-85. 14. Patent 60975 UA, MPK (2011.01) G21K 5/00 G01K 1/08 (2006.01) G21K 1/093 (2006.01). Pristrij dlya opromineniya izolyacijnih materialiv elektronnim puchkom. / Gurin A.G., Lozhkin R.S., Kornilov C.O., Fedorivs'ka O.V. Vinokurov V.O., Gurin V.A., Kolosenko V.V.; NTU "HPI", u201011014; Zayav. 13.09.2011; Opubl. 25.06.2011, Byul. № 12. 15. Vahrushin Yu. P., Anackij A. I. Linejnye indukcionnye uskoriteli. - M.: Atomizdat, 1978. - 248 s.

Поступила 17.05.2013

Гурин Анатолий Григорьевич, д.т.н., проф.,  
Ложкин Руслан Сергеевич  
Національний техніческий університет  
"Харківський політехнічний інститут"  
кафедра "Електроізоляційні та кабельні технології"  
61002, Харків, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 7076663, e-mail: AGurin@kpi.kharkov.ua

Корнилов Евгений Александрович, д.ф.-м.н., проф.  
Інститут плазменної електроніки і нових методів  
ускорення Національного наукового центра  
"Харківський фізико-технічний інститут"  
61108, Харків, ул. Академіческа, 1  
тел. (057) 7001523, e-mail: Kornilov@kipt.kharkov.ua

Gurin A.G., Kornilov E.A., Lozhkin R.S.  
**Prospects of high-current electron beams application  
to radiation polyethylene cross-linking.**

A possibility of applying a pulse-periodic high-current induction electron accelerators to radiation polyethylene cross-linking is considered in the article. A comparative analysis with other devices used for irradiation is made.

**Key words – high-current induction accelerator of electrons,  
radiation polyethylene cross-linking.**

## ДИНАМІКА НАГРІВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

*Виконано аналіз результатів розрахунку пропускної спроможності силових кабелів на напругу 220 кВ. Робота присвячена створенню системи розрахунку допустимого струму високовольтних силових кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією.*

*Выполнен анализ результатов расчетов пропускной способности силовых кабелей на напряжение 220 кВ. Работа посвящена созданию системы расчета допустимого тока высоковольтных силовых кабелей со шитой полиэтиленовой изоляцией.*

**Постановка проблеми.** Найважливішою споживчою властивістю силових кабелів, яка визначає його ліквідність, є спроможність до навантаження та перевантаження (в подальшому – пропускна спроможність).

Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією характерними особливостями є: більші, ніж у традиційних масло наповнених кабелів, площини перерізу жил і товщина ізоляції, що зумовлює одножильну конструкцію кабелю, та як наслідок, особливості іх прокладання і використання, наприклад, прокладання у площині з обов'язковою транспозицією електропровідних екранів при заземленні їх на обох кінцях лінії.

Крім того, для них характерна підвищена гранично допустима температура ізоляції [1], суттєва залежність тепlopровідності і теплоємності ізоляції від температури. Наприклад, питома теплоємність поліетилену за температури 20 °C становить 2300 Дж/кг·°C, а за 80 °C становить 3750 Дж/кг·°C. Тому стандартні методи визначення пропускної спроможності в режимах реальної експлуатації вимагають, щонайменше, перевірки і розрахунком, і експериментально.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пропускна спроможність силових кабелів визначається процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах і в умовах експлуатації [2]. Тому доцільно при визначенні перевантажувальної спроможності цих кабелів порівнювати рішення, одержані різними методами. Найбільш простою і уживаною є експоненційна модель нагрівання кабелю, яка для режиму включення (тобто за температурі довкілля  $t = 0$ ;  $\tau = 0$ ) [3]:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot [1 - \exp(-t/\beta)], \quad (1)$$

де  $\beta$  – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності кабелю на його тепловий опір  $\beta = C \cdot S$  і яка є параметром, що відображає динаміку нагрівання кабелю. Ця модель є наближеною. Досвід її застосування свідчить про придатність для практичних задач точність за умови, що за їх допомогою порівнюють характеристики подібних конструкцій кабелів. Зокрема для теплових розрахунків кабелів у нестационарних режимах, якщо товщина ізоляції невелика відносно розмірів жили [3]. Якщо товщина ізоляції силового кабелю значна, що характерно для високовольтних кабелів, при визначенні перевантажувальної спроможності необхідно врахувати наявність в ізоляції переваду температур. В такому разі використовують метод зосереджених теплоємностей [4]. Найпростіша модель нагрівання кабелю за застосування цього методу є сумою двох експонент:

$$\tau = P \cdot [S_g \cdot (1 - e^{-gt}) + S_f \cdot (1 - e^{-ft})], \quad (2)$$

де  $g, f$  – постійні складові динаміки нагрівання кабелю.

**Ціль і задачі дослідження.** Порівняти динаміку нагрівання кабелю за моделями (1) і (2) для високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією АПвПЭг 1×1300 – 220 з метою визначення впливу теплоємності жили на динаміку нагрівання кабелю за моделлю (2).

Основний матеріал дослідження. За методом зосереджених теплоємностей ізоляція кабелю представлена у вигляді двох зон із рівними величинами теплового опору  $S_{i31} = S_{i32} = S_{i3}/2$ , але з різними теплоємностями:  $C_{i31} = c_{i3} \cdot \pi \cdot r(R - r)$ ;  $C_{i32} = c_{i3} \cdot \pi \cdot R(R - r)$ , де  $c_{i3}$  – питома об'ємна теплоємність ізоляції. Відповідну схему наведено на рис. 1. Параметри схеми заміщення визначає геометричний коефіцієнт  $p$  (коєфіцієнт Ван Вормера [4]):

$$p = [\ln(R/r)]^{-1} - [(R/r) - 1]^{-1}; \quad S_1 = S_{i31}; \quad S_2 = S_{i32};$$

$$C_1 = p \cdot C_{i31} + C_{j3}; \quad C_2 = (1 - p) \cdot C_{i31} + C_{i32}.$$

При включенні під навантаження при температурі навколошнього середовища, тобто при  $t = 0$ ,  $\tau = 0$ , перегрів проводу в момент  $t$ : описує (2), де

$$g = \left( M + \sqrt{M^2 - N} \right) / N; \quad f = \left( M - \sqrt{M^2 - N} \right) / N;$$

$$M = 0,5 \cdot [C_1 \cdot (S_1 + S_2 + S_d) + C_2 \cdot (S_2 + S_d)];$$

$$N = C_1 \cdot S_1 \cdot C_2 \cdot (S_2 + S_d);$$

$$S_g = (g - f)^{-1} \cdot [C_1^{-1} - f(S_1 + S_2 + S_d)];$$

$$S_f = (S_1 + S_2 + S_d) - S_d,$$

$P$  – потужність тепловиділення в проводі в кінці короткотермінового (менше 1 години) режиму нагрівання.

Як приклад, для кабелю АПвПЭг 1×1300 – 220 результати розрахунків кривих нагрівання за моделями (1) і (2) наведені на рис. 2.

Теплові параметри: питомий тепловий опір ізоляції  $\sigma_{i3} = 3,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$ , захисних покривів  $\sigma_{3n} = 3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$ ; тепловий опір ізоляції  $S_{i3} = 0,424 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$ ; тепловий опір довкілля  $S_d = 0,93 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$ ; коефіцієнт тепlopопередачі в повітрі  $\alpha = 8 \text{ Вт} / ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2$ ; теплоємність жили  $C_{j3} = 3236 \text{ Дж} / ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}$ ; теплоємність ізоляції, прилеглої до жили  $C_{i31} = 4327 \text{ Дж} / ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}$ ; теплоємність зовнішнього шару ізоляції  $C_{i32} = 8889 \text{ Дж} / ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}$ .

Параметри схеми заміщення, в якій теплоємності зображені електричними ємностями (див. рис. 1):  $S_1 = S_2 = 0,212 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$ ; коєфіцієнт Ван Вормера:

$$p = \left( \ln \frac{42,9}{20,9} \right)^{-1} - \left( \frac{42,9}{20,9} - 1 \right)^{-1} = 0,441;$$

$$C_1 = p \cdot C_{i31} + C_{j3} = 5143 \text{ Дж} / ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}; \quad C_2 = (1 - p) \cdot C_{i31} + C_{i32} = 11310 \text{ Дж} / ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}.$$

Рис. 2 свідчить про те, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією обидві моделі дають практично одинакові результати щодо **визначення тривало допустимого струму**. Але для визначення перевантажувальної спроможності таких кабелів необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, оскільки динаміка нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції.

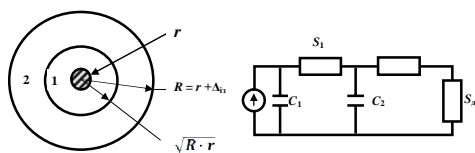


Рис. 1. Схема моделі нагрівання ізольованого проводу в повітрі та відповідна схема заміщення

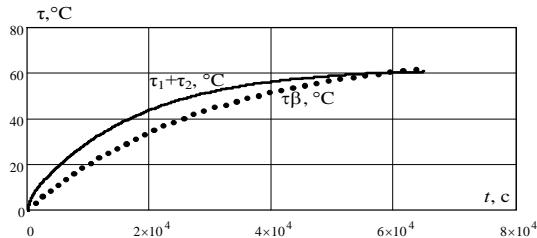


Рис. 2. Криви нагрівання кабелю АПвПЭГ 1×1300 – 220 за моделями (1) і (2)

Аналіз складових кривих нагрівання кабелю АПвПЭГ 1×1300 – 220 (рис. 3), що ілюструють визначення допустимого півгодинного перевантаження і розраховані за моделями (1) і (2), свідчить, що різниця між значеннями півгодинного перегріву кабелю за традиційною моделлю (1)  $\tau_\beta$  і півгодинного перегріву за другою складовою моделлю (2)  $\tau_2 = P[S_f(1 - e^{-ft})]$  не перевищує 2 °C. Такою різницею можна було б знехтувати. Але, по-перше, ця різниця з часом збільшується, а, по-друге, різниця між значеннями півгодинного перегріву кабелю за традиційною моделлю (1)  $\tau_\beta$  і півгодинного перегріву за сумою складових моделей (2)  $\tau_1 + \tau_2$  перевищує 6 °C і ця різниця з часом збільшується.

Тому при визначенні перевантажувальної спроможності високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією за наведеними результатами розрахунків доцільно використання методу зосереджених теплоємностей (модель (2)).

В той же час рекомендація щодо доцільності прямого експериментального чи опосередкованого визначення значень параметрів моделі для розрахунку допустимого струму конкретних кабелів присутня практично в усіх міжнародних і відповідних національних стандартах серії 60287. Вибір значень параметрів і розрахункових моделей має бути обґрунтованим технічно. Економічні складові визначення пропускної спроможності відображені в стандарті ДСТУ IEC60287-3-3:2012, але вони стосуються виключно економічних аспектів в умовах експлуатації.

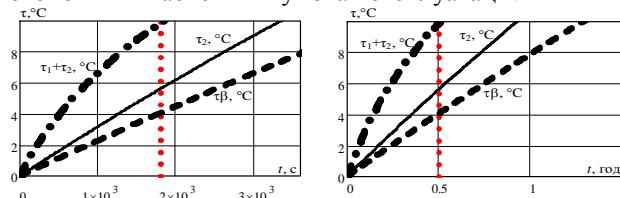


Рис. 3. Складові кривих нагрівання кабелю АПвПЭГ 1×1300 – 220, що ілюструють визначення допустимого півгодинного перевантаження, розраховані за моделями (1) і (2)

Для експериментального визначення теплових параметрів кабелю, зокрема параметра теплопередачі в оточуюче середовище, в його конструкцію вмонтовано спаї чотирьох однакових термопар, які мають лінійну залежність термо-ЕРС аж до температури 350 °C ("мідь-константан" з коефіцієнтом термо-ЕРС 0,05 мВ/К). Термопари розташовані в жилі, в ізоляції, в оболонці, і на поверхні кабелю таким чином, щоб мінімально впливати на температуру в місці спаї.

Одержані таким чином криві нагрівання ізоляції кабелю свідчать про те, що модель (2) теж є досить наближеною і для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією з великим перерізом струмопровідної жили спостерігається відставання перегріву ізоляції від теоретичного, визначеного за (2). Ці результати засвідчили необхідність експериментального дослідження динаміки нагрівання цих, інноваційних для вітчизняної кабельної техніки потужних кабелів з метою побудови моделі, яка б враховувала особливості цих кабелів.

### Висновки.

1) Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією відомі розрахункові моделі дають практично однакові результати щодо **визначення тривало допустимого струму** і таким чином діючі нормативні документи є застосовними.

2) Для визначення перевантажувальної спроможності таких кабелів необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, оскільки динаміка нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції.

3) Експериментального дослідження динаміки нагрівання цих, інноваційних для вітчизняної кабельної техніки потужних кабелів з метою побудови моделі, яка б враховувала особливості цих кабелів свідчить про те, що модель (2) для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією з великим перерізом струмопровідної жили теж є досить наближеною і спостерігається відставання перегріву ізоляції від теоретичного, визначеного за (2).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Щебенюк Л.А., Антонець Т.Ю. До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією. // Вістник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – Вип. 42. – С. 43-46.
- ДСТУ IEC60287-1-1:2012. Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1-1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коєфіцієнт навантаження 100 %) і обчислення втрат. Загальні положення.
- Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антонець Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ.2000. – С. 270-289.
- Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии: [уч. пособие для вузов] – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. SChebenyuk L.A., Antonec' T.Yu. Do vyznachennya propusknoi spromozhnosti visokovoltnih silovih kabeliv z plastmasovoou izolyaciyeu. // Vistnik NTU "HPI". - Harkiv: NTU "HPI". - 2011. - Vip. 42. - S. 43-46. 2. DSTU IEC60287-1-1:2012. Kabeli elektrichni. Obchislennya nominal'noi sili strumu. Chastina 1-1. Spivvidnoshehnya dla obchisleniya nominal'noi sili strumu (koeficient navantazhennya 100 %) i obchislennya vtrat. Zagalni polozenija. 3. Karpushenko V.P., Schebenyuk L.A. , Antonec' Yu.O., Naumenko O.A. Silovi kabeli nizkoj ta serednoj naprugji. Konstruyuvannya, tehnologiya, yakist'. Harkiv: Region-Inform.2000. - C. 270-289. 4. Larina 'E.T. Silovye kabeli i kabel'nye linii: [uch. posobie dlya vuzov] - M.: Energoatomizdat, 1984. - 368 s.

Надійшла 07.05.2013

Золотарев Владимир Михайлович, д.т.н., доц.

Т.Ю. Антонець

ПАО "Завод Южкабель"

61099, Харьков, ул. Автогенная, 7

тел. (057) 7545248

e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Zolotaryov V.M., Antonets T.Yu.

**Dynamics of high-voltage plastic-insulated power cable heating.** Results of power cable capacity computations for the voltage of 220 kV are analyzed. The work deals with developing a current rating computation system for high-voltage cross-linked polyethylene power cables.

**Key words – power cables, plastic insulation, current rating computation.**

## РЕГУЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАБИЛИЗАТОРОВ, НЕ СОДЕРЖАЩИХ СВИНЕЦ, ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

*Представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень з регулювання властивостей композицій полівінілхлориду для ізоляції кабельної продукції з використанням стабілізаторів, що не містять свинцю. Визначені основні закономірності теплофізичних, фізико-механічних, електрофізичних і реологічних характеристик ізоляційних пластикатів під час використання комплексних систем Ca-Zn стабілізаторів.*

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по регулированию свойств композиций на основе поливинилхлорида с использованием стабилизаторов, не содержащих свинец, для изоляции кабельной продукции. Определены основные закономерности теплофизических, физико-механических, электрофизических и реологических характеристик при использовании комплексных систем Ca-Zn стабилизаторов изоляционных пластикатов.*

До настоящего времени в кабельной промышленности широко применялись поливинилхлоридные (ПВХ) пластикаты, содержащие в своих рецептурах стабилизаторы на основе свинца.

Технологическая практика переработки ПВХ показывает, что в последние годы происходит активная замена стабилизаторов, содержащих свинец, на кальций-цинковые. Эта тенденция наиболее ярко выражена в Европейском Союзе (ЕС), так как европейские участники рынка ПВХ обязаны учитывать законодательные положения ЕС.

Вполне реалистичной является задача полной замены в ЕС стабилизаторов, содержащих свинец, на кальций-цинковые к 2015 году. Более того, саму замену и существенное внедрение кальций-цинковых стабилизаторов можно назвать мировой тенденцией развития индустрии ПВХ.

Кроме улучшения экологии, существуют и технические основания для широкого внедрения кальций-цинковых систем. Эти стабилизаторы нетоксичны, обеспечивают погодостойкость, равную или лучшую, чем у систем, содержащих свинец. Условия их переработки практически аналогичны системам, в состав которых входит свинец. Отсутствуют проблемы вторичной переработки.

Поэтому замена свинцовых стабилизаторов на кальций-цинковые в ПВХ пластикатах для изоляции кабельной продукции является актуальной задачей.

Цель настоящей работы – изучение теплофизических, физико-механических, электрофизических и реологических характеристик полимерных композиций на основе ПВХ смолы при использовании стабилизаторов, не содержащих свинец, регулирование технических характеристик ПВХ пластикатов для изоляции кабельной продукции с использованием данных экспериментальных исследований.

Для проведения исследований использовали ПВХ композиции, изготовленные на базе суспензионной ПВХ смолы марки S PVC OXYVINIL 240 США.

В состав композиций входят сложноэфирные пластификаторы (диоктилфталат (ДОФ), диоктилсебацинат (ДОС)), стабилизаторы (соли жирных кислот Ca и Zn), антиоксидант, технологическая добавка [1].

Полимерные композиции получали смешением исходных компонентов в лабораторном смесителе. Полученную смесь вальцевали на лабораторных вальцах. Опытно-промышленные партии изготавливались на линии компаундинга ПВХ пластикатов фирмы X-Compound.

Исследования реологических характеристик проводили методом капиллярной вискозиметрии согласно общепринятой методики на приборе ИИРТ-АМ с обработкой результатов при помощи стандартной компьютерной программы Microsoft Excel. Графические зависимости строились с помощью программы Graph 3D.

Серия опытов по изучению фазовых переходов была проведена на приборе дифференциальной сканирующей колориметрии DSC 1 фирмы METTLER TOLEDO при скорости нагрева 10 град/мин [2].

Температуру хрупкости определяли по ГОСТ 5960 [3]. Определение физико-механических характеристик проводили в соответствии с ДСТУ IEC 60811-1-1 [4] со статистической обработкой результатов. Электрофизические показатели – в соответствии с ГОСТ 6433.1, ГОСТ 6433.2 [5].

Для изготовления кабельной продукции используются пластифицированные композиции на основе ПВХ, т. е. содержащие в своем составе определенное количество пластификаторов.

Одним из основных назначений пластификатора является приданье полимерной композиции морозостойкости – характеристики, предопределяющей низкотемпературные эксплуатационные возможности пластифицированного полимера [6]. Поэтому целесообразно было первоначально определить температуру стеклования ( $T_c$ ) пластификаторов (ДОФ, ДОС и их смесей). Результаты этих исследований представлены на рис. 1 и в табл. 1.

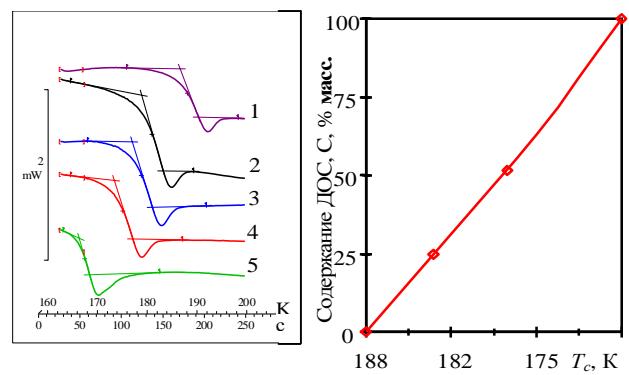


Рис. 1. Залежність температури стекловання ДОФ від співвідношення ДОС в смесі пластификаторів 1 – ДОФ; 2 – ДОФ+25 % ДОС; 3 – ДОФ+33 % ДОС; 4 – ДОФ+50 % ДОС; 5 – ДОС

Температура стеклования ДОФ составляет минус 84,95 °С (188,05 К); ДОС – минус 105,77 °С (167,23 К). Для смеси пластификаторов (ДОФ+ДОС) температура стеклования снижается при увеличении содержания ДОС.

Таблица 1  
Данные DSC исследований

Наименование компонентов	Наименование показателей			
	Начало эффекта, °С (К)	Средняя точка эффекта, °С (К)	Окончание эффекта, °С (К)	$\Delta C_p$ , Дж/г·К
ДОФ	-86,91 (186,09)	-84,95 (188,05)	-82,76 (190,24)	0,524
ДОС	-106,78 (166,22)	-105,77 (167,23)	-104,84 (168,16)	0,420
ЭСМ	-70,02 (202,98)	-63,98 (209,02)	-57,46 (215,54)	0,768
Ca-Zn стабилизатор	-104,23 (168,77)	-99,10 (173,9)	-94,88 (178,12)	0,351
ДОФ+50 % ДОС	-99,69 (173,31)	-97,91 (175,09)	-95,93 (177,07)	0,537
ДОФ+33 % ДОС	-96,19 (176,81)	-94,34 (178,66)	-92,08 (180,92)	0,538
ДОФ+25 % ДОС	-94,16 (178,84)	-92,24 (180,76)	-90,13 (182,87)	0,539
ДОФ+ЭСМ	-86,90 (186,10)	-84,63 (188,37)	-82,18 (190,82)	0,537
ДОФ+ЭСМ	-86,50 (186,50)	-84,36 (188,64)	-81,48 (191,52)	0,694
ДОФ+ЭСМ+Ca-Zn стабилизатор	-88,38 (184,62)	-85,31 (187,69)	-82,05 (190,95)	0,655
ДОФ+ЭСМ+Ca-Zn стабилизатор	-95,12 (177,88)	-92,81 (180,19)	-90,42 (182,58)	0,601

Характеристикой, отвечающей за поведение ПВХ пластика в области низких температур, является температура стеклования ( $T_g$ ). Температура стеклования характеризует переход полимера из стеклообразного в высокоэластичное состояние и обратно. Возможность эксплуатации пластифицированной композиции в области низких температур зависит от температуры хрупкости [6].

Были проведены исследования образцов с различным содержанием пластификаторов. Результаты представлены на рис. 2, 3.

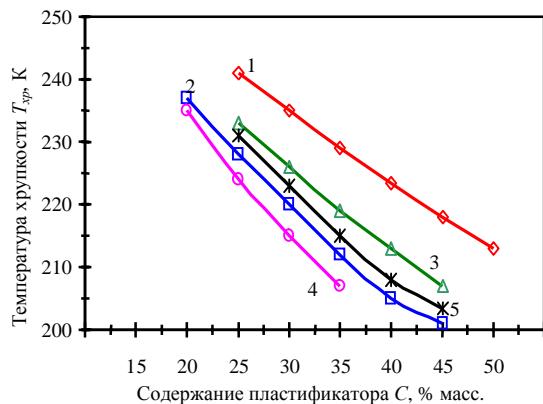


Рис. 2. Зависимость температуры хрупкости ПВХ пластика от количества пластификатора: 1 – ДОФ+свинцовые стабилизаторы; 2 – ДОС+свинцовые стабилизаторы; 3 – ДОФ+Ca-Zn стабилизатор; 4 – ДОС+Ca-Zn стабилизатор; 5 – ДОФ+ДОС+Ca-Zn стабилизатор

Как следует из рис. 2, 3 температуры хрупкости и стеклования пластифицированных композиций снижаются с увеличением содержания пластификаторо-

ра, причем более значительно это снижение наблюдается для композиций, в состав которых входят Ca-Zn стабилизаторы.

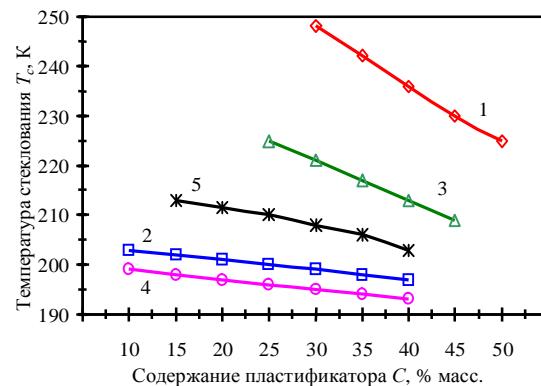


Рис. 3. Зависимость температуры стеклования ПВХ пластика от количества пластификатора:  
1 – ДОФ+свинцовые стабилизаторы; 2 – ДОС+свинцовые стабилизаторы; 3 – ДОФ+Ca-Zn стабилизатор; 4 – ДОС+Ca-Zn стабилизатор; 5 – ДОФ+ДОС+Ca-Zn стабилизатор

Морозостойкость пластиков также зависит от природы пластификатора. В зависимости от термодинамической совместимости полимера и пластификатора различают внутриструктурную и межструктурную пластификацию.

Внутриструктурная пластификация происходит при высоком термодинамическом средстве пластификатора к полимеру, сильном межмолекулярном взаимодействии молекул пластификатора с макромолекулами полимера, набухании растворении полимера в пластификаторе, когда молекулы пластификатора проникают внутрь любых надмолекулярных структур, постепенно их разрушая. Если пластификатор является "плохим" растворителем полимера и смешивается с ним в очень небольших количествах, то его молекулы проникают только в межструктурные пространства, и пластикация называется межструктурной. При межструктурной пластификации истинно растворяется (или совмещается) с полимером незначительное количество пластификатора, молекулы которого адсорбируются на межструктурной поверхности раздела, образуя тончайшие мономолекулярные слои так называемой граничной смазки, облегчающей подвижность надмолекулярных структур.

В наших исследованиях морозостойкость существенно снижается при использовании диоктилсебацината и смеси диоктилсебацината с диоктилфталатом, что характерно для межструктурной пластификации.

На температуру стеклования, как самих пластификаторов, так и полимерной композиции оказывают влияние другие ингредиенты, присутствующие в пластикате. Поэтому целесообразно было провести исследования по определению температур стеклования и удельной теплоемкости процессов стеклования для пластификаторов, эпоксидированного соевого масла (ЭСМ) и Ca-Zn стабилизатора, а также смеси этих компонентов в соотношениях, необходимых для приготовления полимерных композиций. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Как показывают результаты исследований температура стеклования ЭСМ выше ДОФ, Ca-Zn стабилизатора ниже ДОФ. Однако, введение их в ДОФ в

конечном результате понижает температуру до минус 85,31 °C (187,69 K) и минус 92,81 °C (180,19 K) в зависимости от содержания.

Удельная теплоемкость процесса стеклования увеличивается, также наблюдается расширение области перехода в стеклообразное состояние.

При смешении двух пластификаторов ДОФ и ДОС температура стеклования снижается с увеличением количества ДОС.

Удельная теплоемкость смеси ДОФ и ДОС мало изменяется от количества ДОС, что свидетельствует о внутриструктурном характере процесса пластикации, хотя при использовании их отдельно для ДОФ характерен внутриструктурный процесс, для ДОС – межструктурный процесс.

На основании проведенных исследований построены графические зависимости относительной величины температуры хрупкости к температуре стеклования полимерных композиций (параметр  $\alpha$ ), а также относительной величины температуры хрупкости полимерных композиций к температуре стеклования пластификатора (параметр  $\beta$ ) в зависимости от концентрации пластификатора (рис. 4, 5).

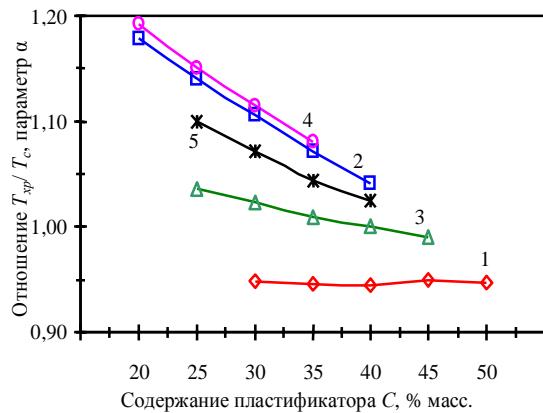


Рис. 4. Зависимость параметра  $\alpha$  от концентрации пластификатора: 1 – ДОФ+свинцовые стабилизаторы; 2 – ДОС+свинцовые стабилизаторы; 3 – ДОФ+Ca-Zn стабилизатор; 4 – ДОС+Ca-Zn стабилизатор; 5 – ДОФ+ДОС+Ca-Zn стабилизатор

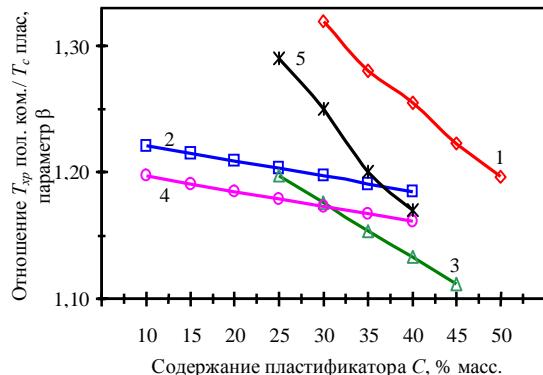


Рис. 5. Зависимость параметра  $\beta$  от количества пластификатора: 1 – ДОФ+свинцовые стабилизаторы; 2 – ДОС+свинцовые стабилизаторы; 3 – ДОФ+Ca-Zn стабилизатор; 4 – ДОС+Ca-Zn стабилизатор; 5 – ДОФ+ДОС+Ca-Zn стабилизатор

Анализ полученных данных указывает на разный характер зависимостей этих показателей для эфирных пластификаторов.

Параметр  $\alpha$  мало изменяется в зависимости от концентрации для ДОФ (рис 4, кривая 1, 3) и значительно изменяется для ДОС (рис. 4, кривая 2, 4). Тогда как параметр  $\beta$  имеет обратную зависимость (рис. 5).

Это позволяет определить (выбрать) оптимальные значения содержания пластификатора для получения ПВХ пластиков, обладающих морозостойкостью : для изоляционных композиций – минус 40 °C (233 K), минус 50 °C (223 K).

Данные экспериментальных исследований позволяют установить следующие зависимости температуры хрупкости от температуры стеклования:

$$T_x = \alpha \cdot T_c; \quad T_x = \beta \cdot T_c, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – относительная величина температуры хрупкости полимерных композиций к температуре стеклования полимерных композиций;  $\beta$  – относительная величина температуры хрупкости полимерных композиций к температуре стеклования пластификатора.

Полученные данные позволяют при определении температуры хрупкости использовать результаты DSC исследований (как экспресс метод), которые являются более точными и менее трудоемкими.

Одной из основных характеристик полимерного материала является прочность. Она характеризует его сопротивляемость разрушению под действием механических воздействий.

Введение пластификатора в полимерную композицию значительно изменяет его механические свойства. Увеличение содержания пластификатора приводит к уменьшению прочности ПВХ пластика, вследствие ослабления межмолекулярных сил при проникновении пластификатора между цепями макромолекул (рис. 6).

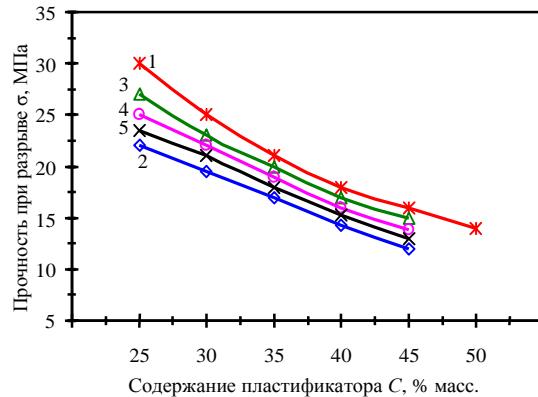


Рис. 6. Зависимость прочности при разрыве от содержания пластификатора: 1 – ДОФ+свинцовые стабилизаторы; 2 – ДОС+свинцовые стабилизаторы; 3 – ДОФ+Ca-Zn стабилизатор; 4 – ДОС+Ca-Zn стабилизатор; 5 – ДОФ+ДОС+Ca-Zn стабилизатор

Анализ данных (рис. 6) показал, что прочность пластифицированного ПВХ пластика незначительно изменяется в зависимости от природы пластификатора, а также зависит от состава стабилизаторов.

При использовании комплексной системы стабилизации Ca-Zn и эпоксидированного соевого масла прочность ПВХ пластиков увеличивается по сравнению со свинцовыми стабилизаторами при одинаковом содержании пластификатора.

Другой важной характеристикой ПВХ пластика является относительное удлинение при разрыве, характеризующее изменение размеров полимерного

образца под действием приложенной к нему нагрузки.

С ростом содержания пластификатора величина относительного удлинения увеличивается, причем более значительно для пластиков с Ca-Zn стабилизаторами (рис. 7).

Наибольшее значение для электрической изоляции имеют электрофизические свойства. Исследования влияния пластификаторов на электрофизические свойства изоляционных пластиков проводили на образцах, изготовленных вальцово-прессованным методом. Толщина образца –  $(1\pm0,1)$  мм; кондиционирование –  $(24\pm1)$  ч при температуре  $(15\text{--}35)$  °C и относительной влажности воздуха  $(45\text{--}75)\%$ . Измерение проводили при температуре 20 °C.

Оценку электрофизических свойств проводили на основании результатов измерений удельного объемного электрического сопротивления. Результаты представлены на рис. 8.

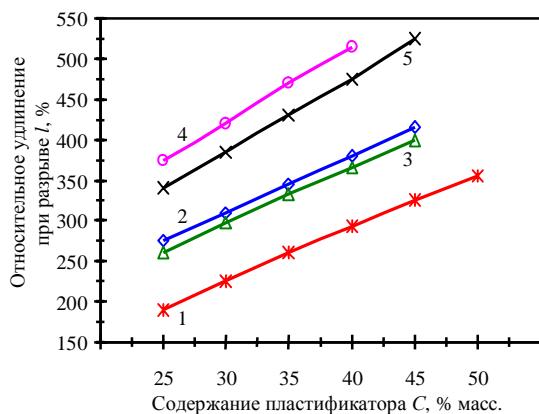


Рис. 7. Зависимость относительного удлинения при разрыве от содержания пластификатора: 1 – ДОФ+свинцовые стабилизаторы; 2 – ДОС+ свинцовые стабилизаторы; 3 – ДОФ+Ca-Zn стабилизатор; 4 – ДОС+Ca-Zn стабилизатор; 5 – ДОФ+ДОС+Ca-Zn стабилизатор

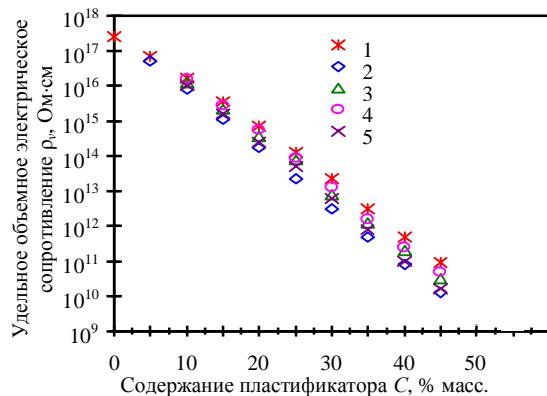


Рис. 8. Зависимость удельного объемного электрического сопротивления от содержания пластификатора: 1–ДОФ+свинцовые стабилизаторы; 2–ДОС+ свинцовые стабилизаторы; 3–ДОФ+Ca-Zn стабилизатор; 4–ДОС+Ca-Zn стабилизатор; 5–ДОФ+ДОС+Ca-Zn стабилизатор

Увеличение содержания пластификатора в составе полимерной композиции, приводящее к повышению гибкости цепей полимера, способствует росту подвижности отдельных его звеньев, вызывая понижение удельного объемного электрического сопротивления.

Высокое удельное объемное электрическое сопротивление пластификатора (ДОФ –  $4,5 \cdot 10^{11}$  Ом·см,

ДОС –  $2,5 \cdot 10^{12}$  Ом·см) не является достаточным условием получения пластика, также обладающего высоким удельным электрическим сопротивлением.

Согласно полученным данным при одном и том же содержании пластификатора (% масс.) в изоляционном пластикате удельное объемное электрическое сопротивление для композиций с ДОС ниже, чем для композиций, содержащих ДОФ.

Таким образом, удовлетворительным методом определения пригодности пластификатора для получения пластика с определенным комплексом диэлектрических характеристик является оценка диэлектрических свойств конечного материала. В этом случае четко проявляется специфика отдельных типов пластификаторов.

Представляет интерес изучение реологических свойств расплава полимерных композиций. Исследования проводили на полимерных композициях, изготовленных с использованием системы комплексных стабилизаторов Ca, Zn, эпоксидированного соевого масла и антиоксиданта. Количество и состав пластификаторов выбраны на основе вышеизложенных результатов исследований. Наиболее распространенным методом исследования реологических свойств расплавов ПВХ пластиков является капиллярная вискозиметрия.

Реологические свойства ПВХ композиций изучали при температуре 170 °C – 200 °C (443 K – 473 K) и нагрузках 21,6 H, 38 H, 50 H, 100 H, 125 H, 216 H.

Используя полученные данные, рассчитывали напряжение сдвига, скорость сдвига и эффективную вязкость.

Напряжение сдвига определяли по формуле [7]

$$\tau = \frac{(P - P_{ex})}{2L\pi R^2}, \quad (2)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;  $P$  – давление, необходимое для обеспечения расхода через капилляр, дин;  $P_{ex}$  – входовые потери, дин;  $R$  – радиус цилиндра, см;  $r$  – радиус капилляра, см;  $L$  – длина капилляра, см.

Скорость сдвига определяли по формуле [7]

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi r^3}, \quad (3)$$

где  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$ ;  $Q$  – расход материала,  $\text{см}^3/\text{с}$  ( $Q = \pi R^2 h$ , здесь  $h$  – стационарная скорость погружения поршня,  $\text{см}/\text{с}$ ;  $R$  – радиус цилиндра, см);  $r$  – радиус капилляра, см.

Эффективную вязкость – по формуле [7]

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}, \quad (4)$$

где  $\eta_{\text{eff}}$  – эффективная вязкость, Па·с.

Строили графики логарифмической зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига. На рис. 9-14 представлены результаты исследований изоляционных пластиков для кабелей:

1 – на номинальное напряжение  $U_0/U \leq 1,8/3$  кВ и температуре хрупкости ( $T_{xp}$ ) минус 40 °C (233 K) (рис. 9, 10);

2 – на номинальное напряжение  $U_0/U = 3,6/6$  кВ и температуре хрупкости ( $T_{xp}$ ) минус 40 °C (233 K) (рис. 11, 12);

3 – на номинальное напряжение  $U_0/U = 3,6/6$  кВ и температуре хрупкости ( $T_{xp}$ ) минус 50 °C (223 K) (рис. 13, 14).

При температуре 170 °C (443 K) изоляционные ПВХ пластикаты возможно перерабатывать только при низких скоростях сдвига (рис. 9-14). При этом напряжение сдвига сильно возрастает.

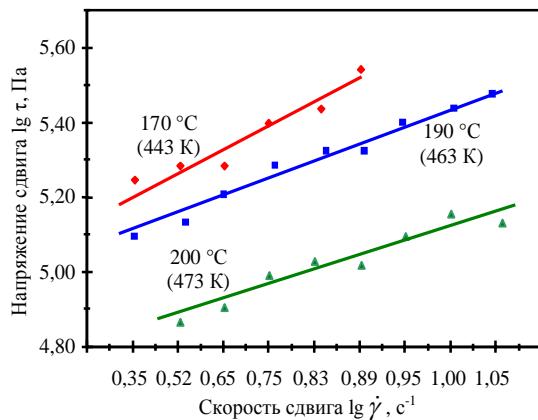


Рис. 9. Зависимость скорости сдвига от напряжения сдвига изоляционного пластиката для кабелей на номинальное напряжение  $U_0/U \leq 1,8/3$  кВ и  $T_{xp}$  минус 40 °C (233 K) при различной температуре и длине капилляра 8 мм

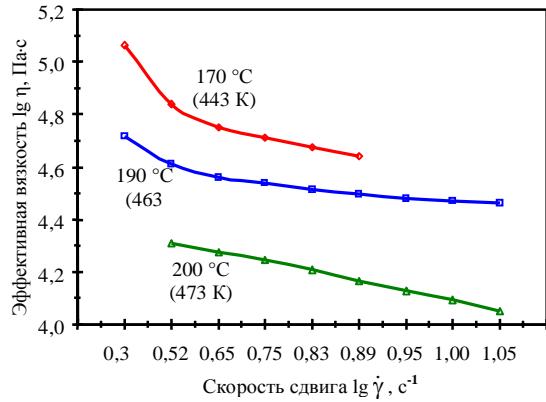


Рис. 10. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига изоляционного пластиката для кабелей на номинальное напряжение  $U_0/U \leq 1,8/3$  кВ и  $T_{xp}$  минус 40 °C (233 K) при различной температуре и длине капилляра 8 мм

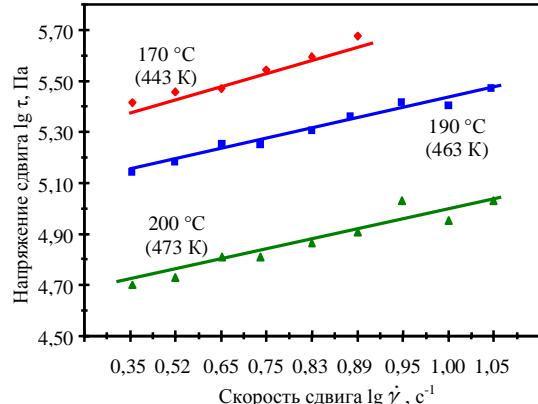


Рис. 11. Зависимость скорости сдвига от напряжения сдвига изоляционного пластиката для кабелей на номинальное напряжение  $U_0/U = 3,6/6$  кВ и  $T_{xp}$  минус 40 °C (233 K) при различной температуре и длине капилляра 8 мм

При температурах 190°C – 200°C (463 K – 473 K) напряжение сдвига увеличивается с увеличением скорости сдвига, однако значительно ниже чем при 170°C (443 K).

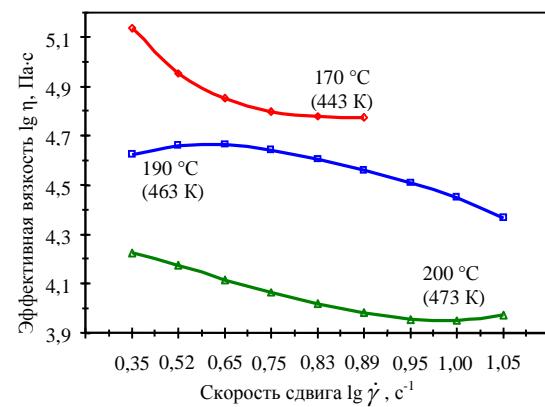


Рис. 12. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига изоляционного пластиката для кабелей на номинальное напряжение  $U_0/U = 3,6/6$  кВ и  $T_{xp}$  минус 40 °C (233 K) при различной температуре и длине капилляра 8 мм

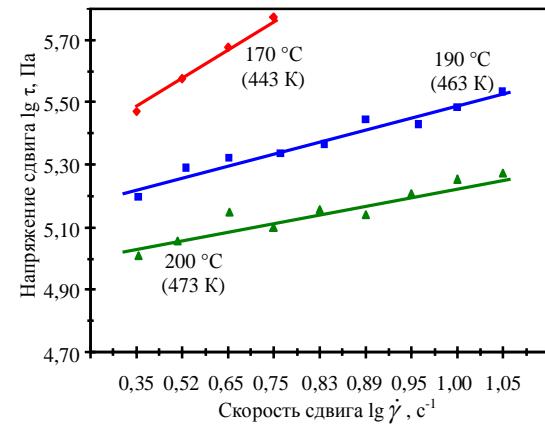


Рис. 13. Зависимость скорости сдвига от напряжения сдвига изоляционного пластиката для кабелей на номинальное напряжение  $U_0/U = 3,6/6$  кВ и  $T_{xp}$  минус 50 °C (223 K) при различной температуре и длине капилляра 8 мм

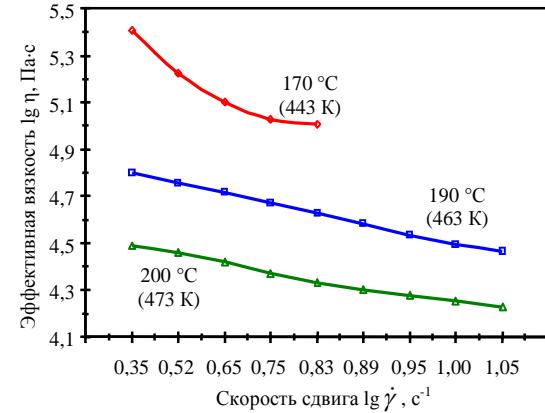


Рис. 14. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига изоляционного пластиката для кабелей на номинальное напряжение  $U_0/U = 3,6/6$  кВ и  $T_{xp}$  минус 50 °C (223 K) при различной температуре и длине капилляра 8 мм

Эффективная вязкость для всех композиций снижается с увеличением температуры и скорости сдвига. При малых скоростях сдвига эффективная вязкость значительно снижается при температурах 170°C – 190°C (443 K– 463 K).

Результаты реологических исследований полимерных композиций представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Результаты реологических исследований

Наименование показателей и температура	Единица измерения	Номер композиции		
		1	2	3
170 °C (443 K)				
Скорость сдвига, $\dot{\gamma}$	$\text{с}^{-1}$	2,23–7,81	2,23–7,81	2,23–5,58
Напряжение сдвига, $\tau$	кПа	17,90–34,90	31,39–47,53	29,59–59,19
Эффективная вязкость, $\eta$	кПа·с	116,50–44,80	136,57–60,83	273,15–106,05
190 °C (463 K)				
Скорость сдвига, $\dot{\gamma}$	$\text{с}^{-1}$	2,23–11,16	2,23–11,16	2,23–11,16
Напряжение сдвига, $\tau$	кПа	11,66–29,59	15,25–26,01	13,45–34,08
Эффективная вязкость, $\eta$	кПа·с	52,22–29,32	40,14–23,30	60,25–30,53
200 °C (473 K)				
Скорость сдвига, $\dot{\gamma}$	$\text{с}^{-1}$	3,35–11,16	2,23–11,16	2,23–11,16
Напряжение сдвига, $\tau$	кПа	6,82–12,56	5,38–10,76	9,86–18,83
Эффективная вязкость, $\eta$	кПа·с	20,35–11,25	16,07–9,64	29,46–16,87

Наибольшее значение напряжения сдвига наблюдается для всех композиций при температуре 170 °C (443 K), что также подтверждается высокими значениями эффективной вязкости расплава.

При повышении температуры до 190 °C (463 K) – 200 °C (473 K) происходит снижение напряжения сдвига и эффективной вязкости. При этом максимальные значения этих параметров наблюдаются для композиции номер 3.

На основании полученных результатов по определению морозостойкости, физико-механических, электрофизических и реологических исследований выбраны оптимальные соотношения ингредиентов для получения ПВХ пластиков изоляции кабельной продукции с использованием Ca-Zn стабилизаторов.

Изоляционные ПВХ пластикаты с температурой хрупкости минус 40 °C (233 K) и минус 50 °C (223 K) предназначены для кабелей на номинальное напряжение  $U_0/U \leq 1,8/3$  кВ ДСТУ IEC 60502-1:2009 [8] и  $U_0/U = 3,6/6$  кВ ДСТУ IEC 60502-2:2009 [9].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Чулеева Е.В., Чулеев В.Л., Золотарев В.М., Василец Л.Г. Композиционные материалы на основе поливинилхлорида. Термофизические, реологические и электрофизические свойства // Хімічна промисловість України. – 2011. – № 6. – С. 48-54.
- Берштейн В.А., Егоров В.М. Дифференциальная сканирующая калориметрия в физикохимии полимеров. – Л.: Химия, 1990. – 256 с.
- ГОСТ 5960-72 Пластикат поливинилхлоридный для изоляции и защитных оболочек проводов и кабелей. Технические условия.
- ДСТУ IEC 60811-1-1:2004 Матеріали ізоляції та оболонок електричних і оптических кабелів. Загальні методи випробування. Частина 1-1. Загальна призначеність. Вимірювання товщини та зовнішніх розмірів. Випробування для визначення механічних властивостей (IEC 60811-1:2001, IDT).

5. ГОСТ 6433.1-71, ГОСТ 6433.2-71 Методы электрических испытаний. Условия окружающей среды при нормализации, кондиционировании и испытании.

6. Штаркман Б.П Пластификация поливинилхлорида. – М.: Химия, 1975. – 248 с.

7. Теплофизические и реологические характеристики полимеров Справочник под редакцией академика Ю. С. Липатова. – К.: Наукова думка, 1977. – 244 с.

8. DSTU IEC 60502-1:2009 Кабелі силові з екструдованою ізоляцією і арматурою до них на номінальну напругу від 1 кВ ( $U_m = 1,2$  кВ) до 30 кВ ( $U_m = 36$  кВ) Частина 1. Кабелі на номінальну напругу 1 кВ ( $U_m = 1,2$  кВ) і 3 кВ ( $U_m = 3,6$  кВ) (IEC 60502-1:2004, IDT).

9. DSTU IEC 60502-2:2009 Кабелі силові з екструдованою ізоляцією і арматурою до них на номінальну напругу від 1 кВ ( $U_m = 1,2$  кВ) до 30 кВ ( $U_m = 36$  кВ) Частина 2. Кабелі на номінальну напругу від 6 кВ ( $U_m = 7,2$  кВ) до 30 кВ ( $U_m = 36$  кВ) (IEC 60502-2:2005, IDT).

**Bibliography (transliterated):** 1. Chuleeva E.V., Chuleev V.L., Zolotarev V.M., Vasilec L.G. Kompozicione materialy na osnove polivinilchlorida. Teplofizicheskie, reologicheskie i `elektrofizicheskie svojstva // Himichna promislovist' Ukrainsi. - 2011. - № 6. - S. 48-54. 2. Bershtejn V.A., Egorov V.M. Differencial'naya skaniruyuschaya kalorimetriya v fizikohimii polimerov. - L: Himiya, 1990. - 256 s. 3. GOST 5960-72 Plastikat polivinilchloridnyj dla izolyacii i zaschitnyh obolochek provodov i kablej. Tehnicheskie usloviya. 4. DSTU IEC 60811-1-1:2004 Materiali izolyaciia ta obolonok elektrichnih kabeliv. Zagal'ni metodi vprobuvuvannya. Chastina 1-1. Zagal'na priznachenist'. Vimiryuvannya tovshchini ta zovnishnih rozmiriv. Viprobuvuvannya dla viznachennya mehanichnih vlastivostej (IES 60811-1-1:2001, IDT). 5. GOST 6433.1-71, GOST 6433.2-71 Metody `elektricheskikh ispytanij. Usloviya okruzhayuschej sredy pri normalizaciji, kondicionirovanii i ispytanii. 6. Shtarkman B.P Plastifikaciya polivinilchlorida. - M.: Himiya, 1975. - 248 s. 7. Teplofizicheskie i reologicheskie harakteristiki polimerov Spravochnik pod redakcijey akademika Yu. S. Lipatova. - K.: Naukova dumka, 1977. - 244 s. 8. DSTU IEC 60502-1:2009 Kabeli silovi z ekstrudovanoyu izolyacicyu i armatura do nih na nominal'nu naprugu vid 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) do 30 kV ( $U_m = 36$  kV) Chastina 1. Kabeli na nominal'nu naprugu 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) i 3 kV ( $U_m = 3,6$  kV) (IES 60502-1:2004, IDT). 9. DSTU IEC 60502-2:2009 Kabeli silovi z ekstrudovanoyu izolyacicyu i armatura do nih na nominal'nu naprugu vid 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) do 30 kV ( $U_m = 36$  kV) Chastina 2. Kabeli na nominal'nu naprugu vid 6 kV ( $U_m = 7,2$  kV) do 30 kV ( $U_m = 36$  kV) (IES 60502-2:2005, IDT).

Поступила 13.05.2013

Золотарев Владимир Михайлович, д.т.н.

Чулеева Елена Владимировна, к.т.н.

Чулеев Владимир Леонидович

Публичное акционерное общество "Завод "Южкабель" 61099, Харьков, ул. Автогенная, 7 тел. (057) 7545312

Zolotaryov V.M., Chuleyeva O.V., Chuleyev V.L.

#### PVC composition properties control with application of lead-free stabilizers for cable product insulation.

The paper presents results of theoretical and experimental research into controlling polyvinylchloride composition properties with application of lead-free stabilizers for cable products insulation. The basic regularities of thermal-physical, physical-mechanical, electrophysical, and rheological characteristics are revealed under utilization of complex Ca-Zn stabilizers of insulating elastrons.

**Key words –** PVC compounds, insulation, temperature of glass transition, temperature of fragility, physical, electrophysics properties, rheological properties, properties control.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ВСЕХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

*В статті запропоновано конструктивне рішення побудови випробувальної системи вимірювання часткових розрядів та виявлення місць пробою з використанням резонансу напруг.*

*В статье предложено конструктивное решение построения испытательной системы измерения частичных разрядов и обнаружения мест пробоя с использованием резонанса напряжений.*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в практику передачи и распределения электрической энергии все шире и шире внедряются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Однако при их производстве существует несколько разновидностей технологии сшивания полиэтилена.

С точки зрения всестороннего рассмотрения, необходимо определиться, что под термином "силовой кабель" или "высоковольтный кабель" обычно понимают кабели на номинальное напряжение от 6 до 500 кВ. В соответствии с рекомендациями МЭК (Международная электротехническая комиссия) кабели передачи и распределения электрической энергии разделены на четыре категории в зависимости от диапазона номинального напряжения: кабели низкого напряжения – менее 6 кВ; кабели среднего напряжения – 6-36 кВ; кабели высокого напряжения – 36-161 кВ; кабели сверхвысокого напряжения – более 161 кВ. Чем выше класс напряжения, тем более высокие требования предъявляются к электрической изоляции.

В качестве изоляционных материалов для силовых кабелей, в зависимости от класса номинального напряжения, используются в основном пропитанная кабельная бумага, поливинилхлоридный (ПВХ) пластикат, различные композиции полиэтилена (в том числе и сшиваемые) и резины. Однако новейшие научные разработки в области полимерной изоляции позволили постепенно вытеснить пропитанную бумажную изоляцию в производстве силовых кабелей всех классов напряжения. Сегодня практически сняты с производства маслонаполненные кабели на рабочее напряжение 110-500 кВ, уступив кабелям с пероксидносшиваемой полиэтиленовой изоляцией.

### НАДЕЖНОСТЬ КАБЕЛЕЙ, КАК ФУНКЦИЯ МЕТОДА СШИВКИ ПОЛИЭТИЛЕНА

Цель настоящей статьи заключается в том, чтобы представить некоторые, наиболее распространенные в мире, научные и технологические подходы, которые могли бы помочь электроэнергетическим компаниям и другим потребителям получить экономичный кабель с высоким сроком службы. Изоляционные материалы для силовых кабелей, типа ПВХ пластика и обычного полиэтилена, имели длительно допустимую температуру эксплуатации до 75 °C, следовательно, они не могли конкурировать с пропитанной бумажной изоляцией, для которой рабочая температура находилась в пределах 80 °C, что ограничивало их применение в кабелях на номинальное напряжение выше 6 кВ.

Эта проблема была решена с появлением пероксидносшитого полиэтилена, с помощью которого появилась возможность повысить рабочую температуру до 90 °C, в режиме перегрузок – до 130 °C, а при коротком замыкании до 250 °C. В результате процесса вулканизации (сшивки) значительно улучшаются такие ценные свойства изоляции, как теплостойкость, механическая прочность, сопротивляемость растрескиванию, стойкость к действию агрессивных сред. Пероксидносший полиэтилен обладает превосходными диэлектрическими свойствами, что дает возможность применять его для всех классов напряжения.

ПАО "ЗАВОД "ЮЖКАБЕЛЬ" первым на постсоветском пространстве освоил производство кабелей энергетического назначения по пероксидносшиваемой технологии на рабочие напряжения от 6 до 330 кВ с использованием наклонных линий газовой вулканизации с 2003 года [1, 4].

Существует три способа сшивания полиэтилена:

- химическая пероксидная сшивка (образование поперечных связей) происходит при помощи вулканизующего агента пероксида (например, перекиси дикумила), который вводится в полимер. При этом на специальных наклонных или вертикальных линиях происходит одновременное трехслойное наложение изоляционной системы – полупроводящего экрана по токопроводящей жиле, собственно изоляции и полупроводящего экрана по изоляции – и сшивка трех слоев в вулканизационной трубе при высокой температуре (до 450 °C) и давлении (14 атм.) в среде инертного, по отношению к изоляции, газа. Такие системы требуют значительных финансовых затрат и поэтому применяются исключительно при производстве кабелей на рабочее напряжение от 6 до 500 кВ. При этой сшивке образуются побочные продукты деления, главным образом из метана, оцетофенола и метилового спирта, которые со временем испаряются сами по себе или могут быть удалены при помощи дегазации в термокамере. Самое главное, что эти побочные продукты деления не образуют ионогенных включений в изоляции;

- сианольная (влажная) вулканизация осуществляется путем введения в полимерные цепочки химических соединений на основе сианов, которые формируют поперечные связи только под воздействием влаги (пар или горячая вода). Процесс вулканизации осуществляется в твердой фазе после наложения изоляционной системы, т.е. имеет место разделение единого технологического процесса на две стадии – экс-

трузия изоляционной системы и ее вулканизация. Это более дешевая технология, т.к. выполняется на обычных горизонтальных линиях. В противоположность пероксидной сшивке при силанольной, продукты деления образуют поперечные связи в материале изоляции и выполняют соединительную функцию между молекулами полиэтилена и не удаляются. Эти включения имеют, по сравнению с основной изоляцией, другие значения диэлектрической проницаемости и проводимости, т.е. являются концентраторами напряженности электрического поля, приводящими к усилению старения изоляции и снижению ресурса кабелей, даже на среднее напряжение. Поскольку вулканизация осуществляется не в инертной, а в водной среде, то это приводит к усилению образования водных триингов.

Этот способ сшивки содействует непосредственному проникновению инородного тела в химический состав изоляции. По этой причине силанольная сшивка используется при производстве кабелей низкого напряжения – до 6 кВ.

- радиационная сшивка, когда сшивание происходит с применением источников ионизационных излучений и применяется для производства проводов с относительно тонкой изоляцией.

Остается напомнить энергетическим компаниям и предприятиям, использующим силовые кабели со сшитой полиэтиленовой изоляцией, что надежность кабельных систем на напряжение 6-500 кВ базируется в мире на пероксидносшиваемой полиэтиленовой изоляции. Процесс "сухой" пероксидной сшивки впервые, и пока единственный в Украине, внедрен на ПАО "ЗАВОД "ЮЖКАБЕЛЬ" и позволяет производить кабели на напряжение от 6 до 330 кВ.

#### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Испытания кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена осуществляют согласно требованиям Международного стандарта МЭК 62067 и подразделяют на приемо-сдаточные, периодические, типовые и преквалификационные.

Для обоснованного выбора научных подходов и методов при разработке специализированных электротехнических систем для испытаний кабелей с полимерной изоляцией на напряжение 6-500 кВ был выполнен аналитический обзор современных способов решения аналогичных задач в отечественной и зарубежной практике. Анализ литературы показал [1, 2, 6], что длительно нагружать изоляцию постоянным напряжением нецелесообразно из-за накопления в микродефектах изоляции значительных объемных зарядов, которые могут пребывать в изоляции длительное время, вызывая ее старение. Эти объемные заряды могут накапливаться на достаточно больших глубинах изоляции.

Исследования, проведенные на заводе, подтвердили, что длительно испытывать повышенным переменным напряжением является также нецелесообразным, т.к. могут возникать дополнительная деструкция изоляции и появление необратимых разрушающих ее микродефектов, которых до испытаний не было [7]. Это объясняется тем, что накопление объемных зарядов при

повышенном переменном напряжении является процессом вероятностным, при котором возможно также проникновение с поверхности медных или алюминиевых жил электронов на большую глубину изоляции. Учитывая, что время исчезновения локальных объемных зарядов на несколько порядков больше, чем время их накопления, то длительных испытаний повышенным переменным напряжением высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей также следует избегать.

Для испытания кабелей повышенным напряжением (до 35 кВ) обычно используют специальной конструкции повышающие измерительные трансформаторы. Мощность таких испытательных трансформаторов определяется произведением величины напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U_{\text{вых}}$  на величину емкостного тока в изоляции  $I_c$ , то есть равна  $S_{\text{тр}} = U_{\text{вых}} \cdot I_c$ .

Применение трансформаторных схем для испытаний высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей длиной в несколько сот метров представляется нецелесообразным, т.к. они требуют применения очень энергоемкого оборудования.

При строительной длине кабеля на напряжение 110 кВ на барабане до 1000 м общая емкость будет составлять  $C \approx 10^{-6} \Phi$ , а общее емкостное сопротивление  $X_c$  переменному току частотой 50 Гц может быть равным:  $X_c = (2\pi f C)^{-1} \approx 3184,7 \Omega$ .

В соответствии с современными требованиями кабели со СПЭ изоляцией на напряжение 110 кВ должны подвергаться приемо-сдаточным испытаниям переменным напряжением различной длительностью, приведенной в табл. 1.

Таблица 1

Испытание кабелей переменным напряжением частоты 50 Гц

Номинальное напряжение, кВ	Испытательное напряжение, кВ	Длительность испытаний, мин.
110	160	30
220	318	30
330	420	60

Учитывая, что тангенс угла диэлектрических потерь составляет  $10^{-3}$ , то потерями мощности на нагрев изоляции можно пренебречь (ошибка составит меньше 0,1 %). В таком случае в кабеле в течение 30 минут должен протекать ток утечки  $I_c$  равный  $I_c = U_c/X_c \approx 50 \text{ A}$  и кабель должен пропускать мощность  $S_c$ , равную  $S_c = U_c^2/X_c \approx 8000 \text{ кВА}$ .

Таким образом, сложно представить использование трансформатора установленной мощности для испытаний высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей.

Немногим более 30 лет назад традиционные трансформаторные измерительные системы, для проведения приемо-сдаточных испытаний, начали заменять резонансными системами, использующими в своих цепях резонансный контур, состоящий из параллельно включенных испытуемого кабеля и реактора с изменяемой индуктивностью [3]. Эти системы позволили в десятки раз уменьшить мощность повышающего трансформатора.

Однако эти системы имеют один из серьезных недостатков – это необходимость выполнять все обо-

рудование на сверхвысокое напряжение до 500 кВ. Такой недостаток может быть преодолим только при узком диапазоне изменения длины испытуемого кабеля. При широкодиапазонном изменении длины испытуемого высоковольтного кабеля будут соответственно изменяться в десятки раз емкостное сопротивление СПЭ изоляции и активное сопротивление токопроводящей жилы. В этой связи реализовать высокодобротный параллельный резонансный контур не представляется возможным, т.к. необходимо, чтобы были равными не только реактивные сопротивления кабеля и компенсирующего реактора, но и их активные сопротивления. Большим недостатком параллельного резонансного контура является то, что при пробое изоляции кабеля или реактора, общее сопротивление такого контура уменьшается в десятки раз, соответствующим образом увеличивая ток короткого замыкания измерительной системы и питающей сети.

### ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РЕЗОНАНСА

Если реализовать в измерительной системе резонанс напряжения, используя контур с последовательным соединением кабеля и высоковольтного реактора, то при больших изменениях емкости кабеля, т.е. его длины, точная настройка контура в резонанс может осуществляться за счет соответствующего реактора [5, 6]. В последовательном резонанском контуре активные сопротивления элементов электротехнической системы складываются и изменение их суммы лишь несущественно изменяет добротность контура и величину тока, потребляемого из сети. Из всех элементов системы только изоляция компенсирующего реактора должна быть рассчитана на полное напряжение 500 кВ, а его обмотки – на токи до 40 А и полную мощность 20 МВА.

Современное развитие мировой электротехнической промышленности позволяет проектировать и изготавливать реакторы на такие мощности и обеспечить линейное регулирование их индуктивности примерно в 20 раз за счет автоматического изменения воздушного зазора сердечника.

Таким образом, для испытания высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей со СПЭ изоляцией была обоснована целесообразность разработки электротехнических систем с последовательным резонансным контуром синусоидального напряжения промышленной частоты.

Поэтому, на ПАО "ЗАВОД "ЮЖКАБЕЛЬ" в основу сверхвысоковольтного испытательного комплекса (СВИК) для испытаний широкого спектра кабелей из СПЭ изоляцией в соответствии с международными нормами и действующими системами менеджмента качества продукции, была положена концепция резонансного возбуждения последовательного высокодобротного индуктивно-емкостного ( $L-C$ ) контура с переменной индуктивностью.

Рассмотрим кратное описание структурной схемы такой системы, основные особенности ее конструктивного исполнения и применения.

По условиям энергетического баланса для поддержания резонанса количество энергии на входе си-

стемы в течение полупериода, должно быть равно количеству энергии, теряемой за это время внутри самой системы, т.е. энергии, равной омическим потерям в элементах системы.

На основании вышеизложенного и необходимости испытания кабелей не только повышенным напряжением, но и измерения величины амплитуды частичных разрядов была разработана структурная схема многокомпонентной испытательной системы, представленная на рис. 1.

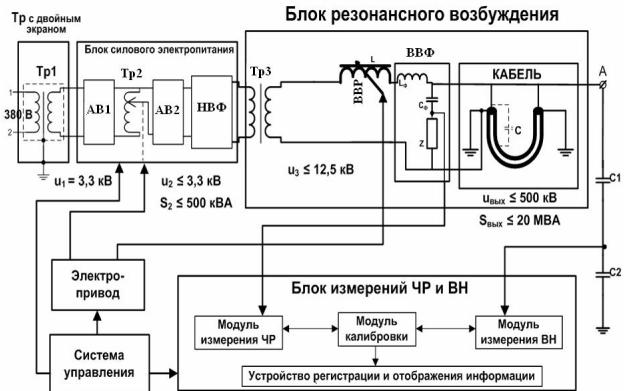


Рис. 1. Схема измерения уровня частичных разрядов и обнаружения места пробоя с использованием резонанса

В состав такой электротехнической системы с последовательным резонансным контуром в качестве оборудования для измерения величины амплитуды частичных разрядов и локализации мест повреждений были включены:

- повышающий трансформатор Тр1 с двойным экраном;
- блок силового электропитания, включающий в себя главный силовой автоматический выключатель (АВ1), высокочастотный регулятор напряжения на основе автотрансформатора Пащеля (Тр2), высоковольтный двухпозиционный контактор-выключатель (АВ2), низковольтный фильтр токов основной частоты (НВФ);
- возбуждающий трансформатор (Тр3);
- высоковольтный реактор (ВВР);
- высоковольтный фильтр (ВВФ);
- масляные кабельные вводы или вводы с дезионизированной водой для подключения высоковольтного или сверхвысоковольтного кабеля;
- силовой кабель со СПЭ изоляцией (объект испытания);
- электропривод для регулирования индуктивности реактора, посредством изменения воздушного зазора его магнитопровода;
- микропроцессорная система управления процессами испытания;
- цифровой блок измерения частичных разрядов и высокого напряжения (Блок измерения ЧР и ВН).

*Разделительный трансформатор с двойным экраном* предназначен для обеспечения двух функций: гальванической развязки испытательной электротехнической системы от системы заземления цеха и ослабления высокочастотных шумов, которые могут появляться в системе электропитания всего используемого электрооборудования. Это позволяет достигать максимально возможной чувствительности при измерении частичных разрядов. Первичная и вторичная

обмотки экранированы с подсоединением через проходные изоляторы с контуром заземления системы. Катушки намотаны проводом с усиленной изоляцией для защиты от бросков напряжения и переходных процессов. Катушки и сердечник размещаются в стальной, заземленной камере, заполненной изоляционным маслом.

**Блок силового электропитания**, конструктивно выполненный в виде стойки, защищенной от электромагнитных полей и включающий:

- главный силовой автоматический выключатель АВ1, который подключает электропитание к испытательной системе и обеспечивает автоматическую защиту этой системы и питающей электросети от аварийных токов;

- регулятор напряжения, который используется для регулирования напряжения на входе возбуждающего трансформатора и соответственно выходного напряжения всей системы. Регулятор напряжения имеет электропривод и управляет от системы управления. В качестве регулятора напряжения используется регулируемый автотрансформатор Пашеля, у которого точность регулирования не превышает 1 %;

- высоковольтный двухпозиционный контактор–выключатель (АВ2), который обеспечивает соединение выхода регулятора напряжения с испытательной системой. Включается только тогда, когда все внешние блокировки системы замкнуты и регулятор напряжения находится в нулевом положении. Контактор может быть разомкнут вручную посредством кнопок на пульте или по сигналу схемы дугового разряда;

- низковольтный фильтр (НВФ), который предназначен для ослабления помех в диапазоне измерения частичных разрядов. Диапазон рабочей частоты НВФ очень мал – 50-60 Гц. Ослабление для токов высших гармонических более чем 40 дБ в диапазоне частот 0,03-1 МГц.

**Возбуждающий трансформатор** (Тр3), включаемый между силовой сетью и реактором, предназначен для повышения питающего напряжения до необходимой величины и обеспечения активной мощности, требуемой системе, гальванической развязки и электростатического экранирования высоковольтной измерительной схемы от сети электропитания. На выходе возбуждающего трансформатора включен разрядник для защиты этого трансформатора и регулируемого реактора от перенапряжений. Этот разрядник конструктивно размещен в корпусе реактора.

**Высоковольтный реактор** – это ключевой компонент резонансной испытательной системы. Высоковольтный реактор расположен в стальной заземленной камере, заполненной изоляционным маслом и снабженной выходным проходным изолятором, по этой причине он называется камерным. Выполнен в виде двух реакторов, весом по 18 т каждый, которые могут соединяться последовательно и параллельно, а конструктивно, расположены один над другим.

На обоих плечах сердечника выполнены воздушные зазоры. Имеется механизм подъема и опускания сердечника. При этом изменяется величина воздушного зазора сердечника, а в результате и индуктивность реактора. Две высоковольтные катушки, соединенные параллельно перекрывают зазор, даже в полностью открытом положении, что предотвращает отклонение силовых магнитных линий.

**Высоковольтный фильтр** (ВВФ) и делитель напряжения, который предназначен для системы измерения уровня частичных разрядов. В фильтре используются высоковольтные конденсаторы и катушки индуктивности. Фильтр представляет собой многоступенчатую конструкцию. Выходная ступень является также делителем напряжения и силовым разделяльным фильтром. В этой ступени установлен четырехполюсник для обеспечения сигналов киловольтметра, детектора дугового разряда, фазовых синхронизатора и детектора ЧР, что обеспечивает ослабление помех более 40 дБ в диапазоне частот 15-500 кГц.

На рис. 2 показана схема замещения электротехнической системы с последовательным резонансным контуром, реализованная на ПАО "ЗАВОД "ЮЖКАБЕЛЬ".

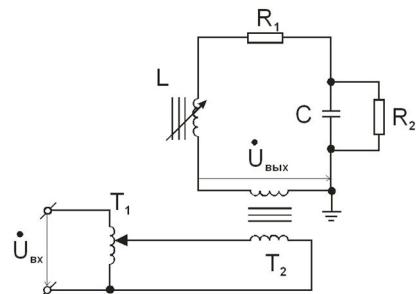


Рис. 2. Электрическая схема испытания силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена с использованием явления последовательного резонанса напряжений

Переменный трансформатор Т<sub>1</sub> позволяет регулировать напряжение на однофазном возбуждающем трансформаторе Т<sub>2</sub>, который снабжает электроэнергией резонансный контур и изолирует испытуемый кабель от остальной цепи. Конденсатор С – это емкость кабеля и другие емкости контура (емкостного делителя напряжения и емкость выходного проходного изолятора). Индуктивность L характеризует изменяющееся индуктивное сопротивление реактора, которое совместно с емкостью С приводят к последовательному резонансу и соответственно повышению напряжения на кабеле. Упрощенная эквивалентная схема замещения установки показана на рис. 3.

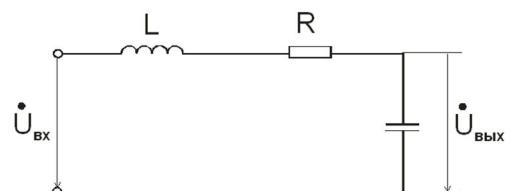


Рис. 3. Упрощенная электрическая схема замещения установки для испытания кабелей с использованием резонанса напряжений

Предполагается, что возбуждающий трансформатор не имеет потерь. Индуктивность L представляет собой общую индуктивность возбуждающего трансформатора и реактора. Сопротивление R включает все активные потери в системе. Для схемы на рис. 3 справедливо уравнение, связывающее комплексные значения выходного и входного напряжения:

$$\dot{U}_{вых} = -\frac{j \cdot X_L \cdot \dot{U}_{вх}}{R + j \cdot (X_L - X_C)},$$

где  $X_L = \omega L$  – индуктивное сопротивление реактора,

$X_C = 1/\omega C$  – емкостное сопротивление кабеля,  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота изменения напряжения питающей сети, а  $f=50$  Гц – циклическая частота его изменения.

В случае достижения резонанса  $X_L = X_C$ , тогда:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = -\frac{j \cdot X_L \cdot \dot{U}_{\text{вх}}}{R} = Q \cdot \dot{U}_{\text{вх}},$$

где  $Q = \omega L/R = 1/\omega RC$  называется добротностью резонансной системы.

Величина добротности в таком последовательном резонанском контуре с высоковольтным регулируемым реактором может быть достигнута  $Q = 20\text{--}40$ . При резонансе реактивные сопротивления  $X_L$  и  $X_C$ , в контуре взаимно компенсируются, фаза тока совпадает с фазой напряжения возбуждающего трансформатора, то есть коэффициент мощности контура  $\cos\varphi = 1$  и входная мощность является чисто активной и равной

$$P = U_{\text{вх}} \cdot I \cdot \cos\varphi = U_{\text{вх}} \cdot I.$$

Реактивная мощность в емкостной нагрузке при тех же условиях равна

$$S_p = U_{\text{вых}} I = Q U_{\text{вх}} I = Q P,$$

где  $S_p$  – реактивная мощность, которая практически равна полной мощности, потребляемой от сети (при  $Q = S_p/P = 20\text{--}40$  ошибка составляет менее 0,13%).

Следовательно, величина входной мощности оказывается в  $Q$  раз меньше, чем мощность в сверхвысоковольтном кабеле и соответственно в реакторе. Уменьшение в 20-40 раз мощности и тока, потребляемых от питающей сети, обеспечивает сокращение в 400-1600 раз активных потерь электроэнергии в элементах системы, не входящих в резонансный контур.

## ВЫВОДЫ

В целом электротехническая измерительная система характеризуется следующими основными достоинствами:

- малая входная мощность объясняется тем, что активная электрическая мощность теряется только в виде омических потерь и является очень малой;
- низкий ток короткого замыкания, т.к. если во время испытания происходит полный пробой изоляции кабеля, то последовательный резонансный контур резко теряет высокое значение добротности контура  $Q$ ;
- низкий уровень нелинейных искажений, т.к. для высоких гармонических составляющих тока реактор будет иметь большое сопротивление и их токи будут малы по сравнению с током основной гармоники;
- переходные перенапряжения могут возникать при использовании трансформаторных и параллельных резонансных систем во время дугового перекрытия изоляции. Эти перенапряжения могут превышать испытательное напряжение в несколько раз. При использовании последовательных резонансных систем переходные перенапряжения очень малы за счет установки на выходе возбуждающего трансформатора разрядника, который защищает как трансформатор, так и регулируемый реактор от возникающих перенапряжений;
- низкий уровень разбалансировки фаз, т.к. входная мощность резонансных систем ниже выходной, то отбор мощности с одной фазы трехфазной сети вызывает гораздо меньшую разбалансировку фаз (несимметричность потребляемых фазных токов), чем при использовании трансформаторных и параллельных резонансных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шидловский А.К. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ / А.К. Шидловский, А.А. Щерба, А.Д. Подольцев, И.Н. Кучерявая, В.М. Золотарев, В.П. Карпушенко, Ю.А. Антонец, Л.Г. Василиц, Г.И. Гримуд // Научно-методическое изд. РТМ к28-004:2006. – Харьков: Майдан, 2007. – 62 с.
2. Техника и электрофизика высоких напряжений / Под ред. В.А. Бржецицкого, В.М. Михайлова. – Харьков: НГУХПИ, Торнадо. – 2005. – 920 с.
3. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии / Э.Т. Ларина. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.
4. Золотарев В.М. Математическая модель электрической напряженности изолированных жил силовых кабелей / В.М. Золотарев, В.П. Карпушенко, А.А. Науменко, С.В. Бузько // Физические и компьютерные технологии: Труды 12 МНТК. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2006. – С. 239-240.
5. Набока Б.Г. Обоснование допустимых режимов эксплуатации резонансных установок для диагностики кабелей / Б.Г. Набока, А.Г. Гурин, С.В. Лактионов, В.М. Золотарев, А.А. Нечаус // Вестник НГУ "ХПИ". – 2005. – № 42. – С. 86-93.
6. Круг К.А. Теоретические основы электротехники / К.А. Круг. – М.-Л.: ГЭП, 1946. – 472 с.
7. Шувалов М.Ю. Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микропрессимента / М.Ю. Шувалов, А.В. Ромашкин, В.Л. Овсиенко // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 49-57.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shidlovskij A.K. Rukovodyschij tehnicheskij material po sooruzheniyu, ispytaniyam i ekspluatacii kabel'nyh linij s ispol'zovaniem kablej s izolyacijej iz sshitogo poli'etilena na napryazhenie 64/110 kV / A.K. Shidlovskij, A.A. Scherba, A.D. Podol'cev, I.N. Kucheryavaya, V.M. Zolotarev, V.P. Karpushenko, Yu.A. Antonec, L.G. Vasilec, G.I. Grimud // Nauchno-metodicheskoe izd. RTM k28-004:2006. - Har'kov: Majdan, 2007. - 62 s. 2. Tehnika i `elektrofizika vysokih napryazhenij / Pod red. V.A. Brzhezickogo, V.M. Mihajlova. - Har'kov: NTU HPI, Tornado. - 2005. - 920 s. 3. Larina 'E.T. Silovye kabeli i vysokovol'tnye kabel'nye linii / 'E.T. Larina. - M.: 'Energoatomizdat, 1996. - 464 s. 4. Zolotarev V.M. Matematischeskaya model' `elektricheskoy napryazhennosti izolirovannyh zhil silovyh kablej / V.M. Zolotarev, V.P. Karpushenko, A.A. Naumenko, S.V. Buz'ko // Fizicheskie i kompyuternye tehnologii: Trudy 12 MNTK. - Har'kov: HNPK "F ED", 2006. - S. 239-240. 5. Naboka B.G. Obosnovanie dopustimyh rezhimov ekspluatacii rezonansnyh ustanovok dlya diagnostiki kablej / B.G. Naboka, A.G. Gurin, S.V. Laktionov, V.M. Zolotarev, A.A. Nechaus // Vestnik NTU "HPI". - 2005. - № 42. - S. 86-93. 6. Krug K.A. Teoreticheskie osnovy `elektrotehniki / K.A. Krug. - M.-L.: GEP, 1946. - 472 s. 7. Shuvalov M.Yu. Analiz defektov v izolyacii silovyh vysokovol'tnyh kablej metodami videomikroskopii i mikro eksperimenta / M.Yu. Shuvalov, A.V. Romashkin, V.L. Ovsienko // `Elektrичество. - 2000. - № 5. - S. 49-57.

Поступила 11.05.2013

Карпушенко В.П., к.э.н.

Золотарев В.В., к.т.н.

Чопов Е.Ю.

Бузько С.В., к.т.н.

Публичное акционерное общество "Завод "Южкабель" 61099, Харьков, ул. Автогенная, 7 тел. (057) 7287264

Karpushenko V.P., Zolotarev V.V., Chopov E.Yu., Buzko S.V.  
An electrical system for testing cross-linked polyethylene power cables of all voltage classes.

The paper introduces a design solution for building a test system for measurement of partial discharge and detection of breakdown spots via voltage resonance.

**Key words –** partial discharge detection, power cables, measurement.

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ, ИХ ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ И СПОСОБЫ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ЭКРАНОВ

*Зроблений огляд робіт, в яких досліджуються шляхи зменшення магнітних полів силових кабельних ліній, стосовно кабелів з ізоляцією із шитого поліетилену. Аналізуються різні аспекти впливу конструктивного виконання екранів однофазних силових кабелів на тепловий режим трьохфазної кабельної лінії, розглянуті питання електромагнітної сумісності силових кабелів.*

*Сделан обзор работ, в которых исследуются способы снижения магнитных полей силовых кабельных линий, применительно к кабелям с изоляцией из шитого полиэтилена. Анализируются различные аспекты конструктивного исполнения экранов однофазных силовых кабелей на тепловой режим трехфазной кабельной линии, рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости силовых кабелей.*

### ВВЕДЕНИЕ

Проблемам, связанным с различными аспектами электромагнитных процессов, происходящих в экранах силовых кабелей, посвящено достаточно большое количество работ. Это, в первую очередь, связано с большим влиянием, которое оказывают экранирующие элементы конструкции кабеля на его тепловой режим работы, а значит и на пропускную способность кабельной линии в целом. Такое влияние связано с потерями энергии на продольные и вихревые токи (что в свою очередь зависит от способа соединения экранов), которые протекают в экранах кабельной линии. Национальные и международные нормативные документы, например, [1, 2] дают рекомендации относительно учета потерь обусловленных протеканием продольных и вихревых токов при различных способах прокладки силовых кабелей, а также при различных способах соединения экранов, то есть – с одной стороны кабельной линии, с двух сторон кабельной линии, применение транспозиции экранов, либо их секционирование. Кроме того, важным аспектом является определение потенциала, наведенного на незаземленном конце экрана.

Следует отметить, что для одножильных кабелей, в конструкции которых присутствует броня из магнитных стальных проволок, указные в [1, 2] рекомендации относительно учета общих потерь в оболочке и в броне дают несколько завышенные значения, для обеспечения безопасной работы при номинальной нагрузке.

Другим важным аспектом, который обуславливает актуальность рассмотрения вопросов конструктивного исполнения экранов с точки зрения их влияния на обеспечение теплового режима и пропускную способность кабельной линии, является вопрос обеспечения электромагнитной совместимости кабельных линий, который рассматривается в целом ряде работ. В некоторых из них снижение магнитных полей достигается введением в конструкцию ферромагнитных элементов, что особенно остро определяет необходимость более тщательного учета некоторых важных факторов, таких как дополнительные потери в экранирующих элементах, а также влияние этих элементов, как на индуктивность кабельной линии, так и на взаимную индуктивность между жилой и экраном.

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Как уже указывалось, при обеспечении электромагнитной совместимости кабельных линий, кроме снижения магнитного поля до необходимого уровня, следует учитывать дополнительный нагрев экранирующих элементов и, как следствие, снижение пропускной способности кабельной линии. В качестве примера такого негативного влияния можно привести данные работы [3], где рассматривались аспекты, связанные с прокладкой силовых кабелей в стальных трубах (при их пофазной прокладке), что в рассматриваемом случае, правда, производилось для обеспечения необходимых требований обеспечения механической целостности кабеля. Согласно измерениям, проведенным в [3], температура стальной трубы, в которой был проложен кабель составляла 140–145 °C, что и послужило причиной выхода кабеля из строя.

Переходя к общим вопросам, связанным с конструктивным исполнением экранов кабелей, следует отметить, что протекание по экрану токов короткого замыкания обуславливает сложность выбора его сечения. С точки зрения обеспечения надежной работы и термической устойчивости экрана при коротких замыканиях сечение экрана необходимо увеличивать. В то же время, с точки зрения обеспечения максимальной пропускной способности, сечение экрана необходимо уменьшать. Кроме того, как результат, сечение экрана влияет и на поля рассеивания кабельных линий. При соединении экранов с двух сторон система токов в них сдвинута на 180° по отношению к токам в жиле, что позволяет значительно компенсировать магнитное поле кабельной линии. Для собственного поля, благодаря характеру протекания вихревых токов, по терминологии [4], экран кабеля является открытым, неправильным экраном, для внешних полей экран кабеля – замкнутая в электромагнитном смысле оболочка. Из рассматриваемых в литературе способов снижения магнитных полей кабельных линий наиболее распространенными способами являются следующие [5]:

1. Снижение магнитных полей путем изменения геометрического расположения фаз и расстояния между фазами. Так, симметричное расположение фаз

© И.А. Костюков

(по вершинам равностороннего треугольника) более благоприятно для компенсации внешних магнитных полей по сравнению с их расположением в плоскости.

2. Применение электромагнитных и магнитных экранов. В литературе рассматриваются как плоские, так и замкнутые экраны, в том числе и двойные. Кроме того, согласно литературным данным, применение магнитных экранов может быть продиктовано не только целями обеспечения электромагнитной совместимости, а и целями уменьшения потерь от протекания продольных токов. Так, применение в [6] магнитодиэлектриков в экспериментальной конструкции кабеля между жилой и медным экраном при экспериментальной проверке позволило снизить продольные токи на 80% по сравнению с традиционной конструкцией кабеля без магнитодиэлектрика.

3. Применение компенсирующих витков (compensating passive (active) loops) рассмотренное в [7] на примере кабельной линии с экранами, заземленными с одной стороны. Здесь экранирующий эффект достигается за счет взаимодействия собственного поля кабельной линии с полем токов индуцируемых в специально проложенных проводящих замкнутых контурах.

Кроме того, силовой кабель с двойным экраном, внутренняя часть которого представляла обычный проволочный медный экран, а внешняя – ленточный ферромагнитный, был теоретически и экспериментально исследован в целом цикле работ [8-10]. При этом медные экраны были соединены с двух сторон кабельной линии, ферромагнитный экран заземлялся только с одной стороны. Интересно отметить, что если в [6] целью применения магнитодиэлектрика было уменьшение потерь обусловленных продольными токами, то в указанном выше цикле работ магнитный экран применялся для прямо противоположных целей – с целью увеличения продольных токов, для достижения необходимого экранирующего эффекта. Указанные конструктивные изменения были предложены для кабелей, проложенных в плоскости, как для наиболее неблагоприятного их геометрического расположения с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости. Практическая реализация указанных конструктивных изменений для 20 кВ кабеля была проведена в [10]. Кроме того, кабельная линия, проложенная в стальной трубе с целью обеспечения электромагнитной совместимости, рассматривалась в [11], применение U-образных экранов, из алюминия и ферромагнитных материалов, с поперечным перекрытием было рассмотрено в [12, 13]. В качестве примера работ, в которых рассматривается электромагнитное экранирование трехфазных токопроводов можно привести статьи [14, 15]. В [14] в качестве экранов рассмотрено применение двух алюминиевых U-образных элементов, были определены оптимальные расстояния с точки зрения эффективности экранирования между элементами экрана, в [15] проведено экспериментальное исследование эффективности экранирования трехфазного токопровода плоским двойным электромагнитным экраном.

Рассматривая случай заземления экранов только с одной стороны кабельной линии, то есть для того случая, когда потери обусловлены протеканием только вихревых токов, потери, обусловленные ими, а

также выражения для коэффициентов экранирования находят при рассмотрении потока комплексного вектора Пойнтинга в радиальном направлении, через стенку экрана:

$$\dot{S} = \dot{E}_z \times \dot{H}_\varphi, \quad (1)$$

где  $\dot{E}_z$  и  $\dot{H}_\varphi$  – комплексные амплитуды соответственно напряженности продольной составляющей электрического и тангенциальной составляющей магнитного полей (сопряженное значение).

При учете потерь, обусловленных протеканием только вихревых токов, для одиночного проводника с током и магнитным экраном – простейшей модели для рассмотрения потерь от вихревых токов, можно попытаться оценивать потери используя результаты Я. Туровского [4, 16]. Указанные результаты были получены для квазистационарного приближения и поля, которое меняется по гармоническому закону, при интегрировании уравнения для экрана:

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{E}_m}{\partial r} = \alpha^2 \dot{E}_m, \quad (2)$$

где  $\alpha = (jw\mu\gamma)^{0.5}$ ,  $w$  – угловая частота,  $\gamma$ ,  $\mu$  – соответственно удельная проводимость и магнитная проницаемость экрана.

Решение (2) записывается в виде суммы функций Ганкеля нулевого порядка (благодаря одномерности поля). Таким образом, в [4 с. 215-224], (при нахождении напряженности магнитного поля на внутренней поверхности экрана из закона полного тока), были получены выражения для потерь активной мощности в экране, потребления реактивной мощности, коэффициента мощности экрана как потребителя.

$$P = a_p \zeta P_0, \quad (3)$$

где  $P$  – потери активной мощности,  $a_p = 1,4$  – коэффициент, в соответствии с методом Неймана учитывающий нелинейность магнитной проницаемости,  $\zeta$  – коэффициент, учитывающий толщину экрана, оцениваемый по кривым [4, ст. 184].

$$\zeta = \frac{\sin(kd) - \sin(kd)}{ch(kd) + \cos(kd)}, \quad (4)$$

где  $d$  – толщина экрана,

$$k = \sqrt{\frac{w\mu\gamma}{2}}. \quad (5)$$

Для стальных экранов при больших магнитных полях, то есть для случая когда напряженность поля больше величины, которая соответствует максимальной магнитной проницаемости, как следствие того, что электромагнитная волна затухает несколько быстрее, чем при слабых полях, при определении коэффициента  $\zeta$  учитывается не фактическая толщина экрана, а расчетная, равная 1,4d [4].

$$P_0 = \pi D_0 l \left( 1 + \frac{D_0}{D_1} \right) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\gamma}} \frac{H_{0m}^2}{2}, \quad (6)$$

где  $D_0$  – внутренний диаметр экрана,  $D_1$  – внешний диаметр экрана,  $l$  – длина экрана,  $H_{0m}$  определяется из закона полного тока:

$$H_{0m} = \frac{\sqrt{2}I}{2\pi r}, \quad (7)$$

где  $r$  – внутренний радиус экрана.

Для потребления реактивной мощности имеем:

$$Q = a_q \psi P_0, \quad (8)$$

где  $a_q = 0,85$ ,  $\psi$  – коэффициент, учитывающий толщину экрана, оцениваемый по данным [4, ст. 184].

$$\psi = \frac{sh(kd) + \sin(kd)}{ch(kd) + \cos(kd)}. \quad (9)$$

Относительно учета более быстрого затухания электромагнитной волны при сильных полях и выбора расчетной толщины экрана при определении коэффициента  $\psi$  справедливы те же замечания что и для формулы (4).

Для потребления кажущейся мощности:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (10)$$

Коэффициент мощности экрана как потребителя определяется из:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (11)$$

На рис. 1-3 приведены рассчитанные по формулам (4) – (10) энергетические характеристики экрана при различных токах в жиле. Расчеты приведены для магнитного экрана длиной 1 м, при оценивании магнитных проницаемостей экрана по кривым, приведенным в [4, ст. 61] и удельной электропроводности материала экрана  $\gamma = 10^6$  (См/м)  $D_0, D_1$  соответственно принимались равными 11 см и 11.3 см.

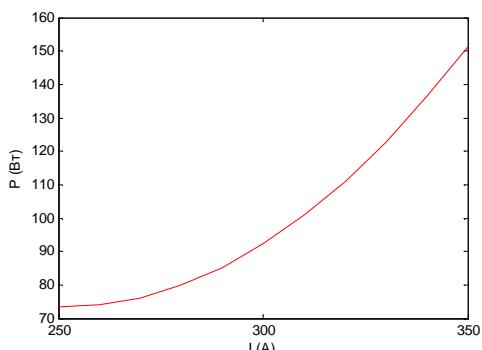


Рис. 1. Зависимость потерь активной мощности в магнитном экране от величины тока жилы

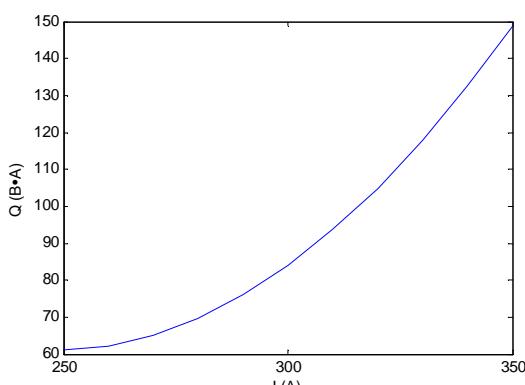


Рис. 2. Зависимость потребления реактивной мощности в магнитном экране от величины тока жилы

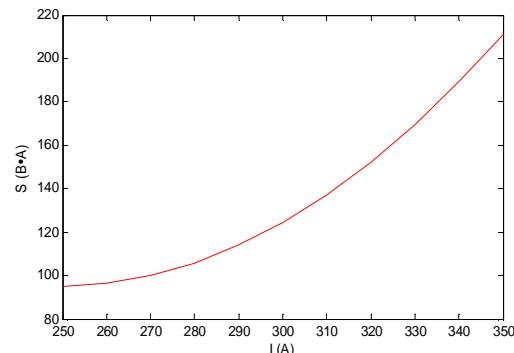


Рис. 3. Зависимость потребления кажущейся мощности в магнитном экране от величины тока жилы

Согласно проведенным расчетам, коэффициент мощности экрана как потребителя при токах 250 А, 300 А, 350 А составляет, соответственно, 0.77, 0.74, 0.71.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены основные пути уменьшения полей рассеивания кабельных линий, среди которых важное место занимает электромагнитное и магнитное экранирование. Особо важна разработка таких путей для самого неблагоприятного, с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости, расположения фаз кабельной линии (в плоскости) и при соединении экранов с одной стороны, то есть при отсутствии продольных токов.

В большинстве случаев предлагаемые с целью уменьшения магнитных полей кабельных линий конструктивные изменения приводят к ухудшению теплового режима (в частности увеличение потерь обусловленных вихревыми токами) и, как следствие, к уменьшению пропускной способности кабельной линии. Как видно из представленных расчетов (рис. 1) проведенным по результатам, полученным в [4] с помощью волнового метода, указанные потери быстро растут с увеличением тока жилы, который в расчетах, кроме того, принимал не самое большое значение из возможных. В качестве одного из путей уменьшения указанных потерь может быть применение не сплошных, а проволочных магнитных экранов. Такое рассмотрение может иметь свое приложение и для учета потерь от вихревых токов в силовых кабелях типа МНСК. Также актуальным является сравнение эффективности применения магнитодиэлектриков между жилой и медным экраном, описанное в [6], с целью уменьшения потерь от продольных токов, с более распространенными путями подавления продольных токов, такими как применение транспозиции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ДСТУ IEC 60287-1-1:2009. Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1-1: Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коєфіцієнт навантаження 100%) і обчислення втрат. Загальні положення.
- IEC 287-1-1 Electric cables – Calculation of the current rating-Current rating equations (100% load factor) and calculations of losses Section 1 – General 1995.
- Гура К.Ю. Особенности прокладки кабелей с изоляцией СПЭ в стальных трубах / К. Ю. Гура, Е.В. Остапенко // Электропанорама. – 2010. – № 49. – С. 33-36.

4. Туровский Я. Техническая электродинамика // Я. Туровский. – М.: Энергия, 1974. – 448 с.
5. Bascom E. C. Magnetic field management considerations for underground cable duct bank / E. C. Bascom, J. H. Cooper, W. Bunker, R. Piteo, A. M. Regan, S. A. Boggs. // Transmission and distribution conference and exposition, 9 – 14 October 2005. Conference Publications. 2005. – P. 414-420.
6. Бардаков О.А. Повышение передаваемой мощности кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / О.А. Бардаков// Энергосберегающие технологии: международная молодежная конференция, 28-30 июня 2011 г. материалы докл. – Т.: 2011. – С. 209-211.
7. J.C.P. Lopez, P.C. Romero The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – Vol. 99, № 2. – P. 674-683.
8. D'Amore M. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from power cable lines / M. D'Amore, E. Menghi, M.S. Sarto. // Electromagnetic compatibility 2003 IEEE international symposium, 18-22 August 2003. Conference publications. Vol. 1, 2003, P. 203-208.
9. D'Amore M. Design of new high-voltage "green" cables generating low magnetic field levels / M. D'Amore, F. M. Gatta, D. Paladino, M. S. Sarto // IEEE Power engineering society general meeting, 8 – 10 June 2004. Conference publications. Vol. 1. 2004, P. 457 – 462.
10. D'Amore New double-shielded power cables generating low magnetic field levels / M. D'Amore D. Paladino, M.S. Sarto // International symposium on electromagnetic compatibility. 8-12 August 2005. Conference publications. Vol. 1 2005, P. 179-184.
11. R. Conti, A. Giorgi, R. Rendina, L. Sartore, E.A. Sena Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines // Proceedings of Power Tech Conference. 23-26 June 2003. Conference publications. Vol. 2. 6 p.
12. P. Sergeant, S. Koroglu. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables // Progress in electromagnetic research. – 2011. – Vol. 115. – P. 441-460.
13. J.C. del Pino-Lopez, P. Cruz-Romero, L. Serrano-Iribarneay. Impact of electromagnetic losses in closed two-component magnetic shields on the ampacity of underground power cables // Progress in electromagnetic research. – 2013. – Vol. 135. – P. 601-625.
14. Резинкина М.М. Снижение уровня магнитного поля подземных токопроводов электромагнитными экранами, состоящими из U-образных элементов / М.М. Резинкина, В.С. Гринченко // Вісник НТУ "ХПІ". – 2012. – № 49. – С. 73-78.
15. Резинкина М. М. Экспериментальное исследование распределения магнитной индукции трехфазного токопровода при наличии электропроводящих пластин / М.М. Резинкина, В.С. Гринченко // Вісник НТУ "ХПІ". – № 49. – С. 75-81.
16. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин // Я. Туровский. М.: Энергоатомиздат, 1982. – 200 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. DSTU IEC 60287-1-1:2009. Kabeli elektrichni. Obchislenya nominal'noi sili strumu. Chastina 1-1: Spivvidnostennya dlya obchislenya nominal'noi sili strumu (koeficient navantazhennya 100%) i obchislenya vrat. Zagal'ni polozhennya. 2. IEC 287-1-1 Electric cables - Calculation of the current rating-Current rating equations (100% load factor) and calculations of losses Section 1 - General 1995. 3. Gura K.Yu. Osobennosti prokladki kablej s izolyacijei SP'E v stal'nyh trubah / K. Yu. Gura, E.V. Ostapenko // Elektropano

rama. – 2010. – № 49. – С. 33-36. 4. Turovskij Ya. Tehnicheskaya `elektrodinamika // Ya. Turovskij. - M.: `Energiya, 1974. - 448 s. 5. Bascom E. C. Magnetic field management considerations for underground cable duct bank / E. C. Bascom, J. H. Cooper, W. Bunker, R. Piteo, A. M. Regan, S. A. Boggs. // Transmission and distribution conference and exposition, 9 - 14 October 2005. Conference Publications. 2005. - P. 414-420. 6. Bardakov O.A. Povyshenie peredavaemoj moschnosti kablej s izolyacijiz sshitogo poli`etilena / O.A. Bardakov// `Energosberegayuschie tehnologii: mezhdunarodnaya molodezhnaya konferenciya, 28-30 iyunya 2011 g. materialy dokl. - T.: 2011. - S. 209-211. 7. J.C.P. Lopez, P.C. Romero The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2011. - Vol. 99, № 2. - P. 674-683. 8. D'Amore M. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from power cable lines / M. D'Amore, E. Menghi, M.S. Sarto. // Electromagnetic compatibility 2003 IEEE international symposium, 18-22 August 2003. Conference publications. Vol. 1, 2003, P. 203-208. 9. D'Amore M. Design of new high-voltage "green" cables generating low magnetic field levels / M. D'Amore, F. M. Gatta, D. Paladino, M. S. Sarto // IEEE Power engineering society general meeting, 8 - 10 June 2004. Conference publications. Vol. 1 2004, P. 457 - 462. 10. D'Amore New double-shielded power cables generating low magnetic field levels / M. D'Amore D. Paladino, M.S. Sarto // International symposium on electromagnetic compatibility. 8-12 August 2005. Conference publications. Vol. 1 2005, P. 179-184. 11. R. Conti, A. Giorgi, R. Rendina, L. Sartore, E.A. Sena Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines // Proceedings of Power Tech Conference. 23-26 June 2003. Conference publications. Vol. 2. 6 p. 12. P. Sergeant, S. Koroglu. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables // Progress in electromagnetic research. - 2011. - Vol. 115. - P. 441-460. 13. J.C. del Pino-Lopez, P. Cruz-Romero, L. Serrano-Iribarneay. Impact of electromagnetic losses in closed two-component magnetic shields on the ampacity of underground power cables // Progress in electromagnetic research. - 2013. - Vol. 135. - P. 601-625. 14. Rezinkina M.M. Snizhenie urovnya magnitnogo polya podzemnyh tokoprovodov `elektromagnitnymi `ekranami, sostoyaschimi iz U-obraznyh `elementov / M.M. Rezinkina, V.S. Grinchenko // Visnik NTU "HPI". - 2012. - № 49. - С. 73-78. 15. Rezinkina M. M. `Ekspеримент'noe issledovanie raspredele-niya magnitnoj indukciij trehfaznogo tokoprovoda pri nalichii `elektroprovodyaschih plastin / M.M. Rezinkina, V.S. Grinchenko // Visnik NTU "HPI". - № 49. - С. 75-81. 16. Turovskij Ya. `Elektromagnitnye raschety `elementov `elektricheskikh mashin // Ya. Turovskij. M.: `Energoatomizdat, 1982. - 200 c.

Поступила 03.06.2013

Костюков Иван Александрович, аспирант.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра электроизоляционной и кабельной техники  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
e-mail: Kostukow.Ivan@yandex.ru

Kostukov I.A.

**General questions as to providing electromagnetic compatibility of power cable lines, their amperage capacity and types of shield construction.**

Works studying ways of reducing magnetic fields of cross-linked polyethylene power cable lines are reviewed. Different aspects of single-phase power cable shield construction influence on thermal conditions of a three-phase power cable line are analyzed. Questions concerning electromagnetic compatibility of power cables are considered.

**Key words – eddy current loss, circulating current, electromagnetic compatibility.**

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА НАИБОЛЬШЕГО РАБОЧЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В СЕТЯХ 6 ... 35 кВ

*У статті показано, що вибір нелінійного обмежувача перенапруг (ОПН) в мережах 6 ... 35 кВ з найбільшою тривалою допустимою робочою напругою, яка на 10 % перевищує найбільшу робочу напругу мережі, забезпечить ОПН від перегріву і подальшого пробою при ненормованому часі існування однофазних дугових замикань.*

*В статье показано, что выбор нелинейного ограничителя перенапряжений (ОПН) в сетях 6 ... 35 кВ с наибольшим длительно допустимым рабочим напряжением, на 10 % превышающим наибольшее рабочее напряжение сети, обеспечит ОПН от перегрева и последующего пробоя при ненормируемом времени существования однофазных дуговых замыканий.*

При выборе ограничителей перенапряжений (ОПН) необходимо решать следующие задачи:

1. ОПН должен ограничивать коммутационные и грозовые перенапряжения до значений, при которых будет обеспечена надежная работа защищаемого оборудования в течение всего срока службы ОПН.

2. ОПН должен надежно работать без разрушения и изменения параметров при непрерывном воздействии длительных рабочих и кратковременных повышений в рабочих режимах.

При выборе ОПН для защиты изоляции электрооборудования в сетях 6 ... 35 кВ необходимо учитывать возможность его повреждения при возникновении в сети длительного режима однофазного короткого замыкания (ОДЗ), вызывающего дуговые перенапряжения от переходных процессов при перемежающихся дуговых разрядах. Кратность таких перенапряжений может достигать  $(3 \dots 3,2) \cdot U_{\phi \max}$ , где  $U_{\phi \max}$  – наибольшее значение амплитуды фазного напряжения. В сетях с изолированной нейтралью режим ОДЗ может существовать от нескольких минут до 6 и более часов. Характер перенапряжений при ОДЗ подробно описан в [1]. При ОДЗ величина энергии, рассеиваемой варисторами в ОПН за один цикл "зажигания-гашения" дуги, составляет при незаземленной нейтрали, по разным оценкам, от 0,05 кДж до 4 кДж.

Частота повторений циклов может превышать 50 Гц. Кроме этого, в переходном процессе после погасания дуги на составляющую напряжения 50 Гц накладывается высокочастотная составляющая (около 1200 Гц), практически затухающая к моменту следующего повторного зажигания дуги [2]. Под действием импульсных токов, протекающих через варисторы при ОДЗ, возможен перегрев и пробой ОПН, поэтому ОПН должен быть отстроен от опасных энергетических воздействий.

Амплитуда дуговых перенапряжений носит статистический характер, при этом доля перенапряжений с кратностью  $(2,5 \dots 3,2) \cdot U_{\phi \max}$  составляет не более 10 % и частота их повторения невелика, следовательно, основную опасность, с точки зрения перегрева ОПН, составляют часто повторяющиеся импульсные перенапряжения кратностью менее 2,5. Таким образом, для потока мелких часто повторяю-

щихся импульсных дуговых перенапряжений  $K_n < 2,5$  ОПН должен быть закрыт. Известно, что заметный рост тока через ОПН (открытие) происходит при достижении на его зажимах напряжения, равного классификационному –  $U_{kl}$ , т.е. напряжения, когда через ОПН начинает протекать ток от 1 мА до 3 мА (в зависимости от диаметра варисторов).

Из многочисленных данных, приводимых в каталогах на варисторы и ОПН, можно убедиться, что между классификационным напряжением и наибольшим рабочим напряжением сети  $U_{pro}$  имеет место соотношение:

$$U_{kl} = (1,224 \dots 1,37) \cdot U_{pro}, \text{ кВ.} \quad (1)$$

Если отсечку потока дуговых импульсов напряжения принять на уровне  $K_n = 2,5$ , то условие отстройки может быть определено из уравнения второго закона Кирхгофа:

$$U_{dug} = K_n \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_{pro}}{\sqrt{3}} = I_{kl} \cdot Z + U_{pro}, \quad (2)$$

где  $U_{pro}$  – наибольшее рабочее напряжение сети;  $Z$  – волновое сопротивление подводящих проводов.

В уравнении (2) можно сделать подстановку  $U_{pro} = U_{kl}$ , поскольку ОПН открывается при  $U_{opn} = U_{kl}$ . Учитывая, что  $Z \approx 400$  Ом и приняв  $I_{kl} = 10^{-3}$  А, получим, что  $I_{kl} \cdot Z \approx 0,4$  В. Следовательно, этим падением напряжения можно пренебречь. Тогда получаем условие отстройки:

$$2,5 \cdot \frac{U_{pro}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \leq (1,224 \dots 1,37) \cdot U_{pro} \cdot \sqrt{2}. \quad (3)$$

После простых действий получим:

$$U_{pro} \sim 1,1 \cdot U_{pro}, \quad (4)$$

т.е. для обеспечения отстройки наибольшее рабочее напряжение ограничителя должно быть примерно на 10 % больше наибольшего рабочего напряжения сети.

Эффект повышения надежности ОПН в случае  $U_{pro} > U_{pro}$  виден из графика, приведенного для двух ОПН напряжением 10 кВ (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что повышение  $U_{pro}$  (поднятие вольт-амперной характеристики) в пределах 10 % приводит к снижению более чем на 3 порядка (с 17,8 А до 6,3 кА) амплитуды импульсных токов, протекающих через ОПН при  $K_n < 2,5$ , и следовательно,

к уменьшению опасного энергетического воздействия на варисторы. Таким образом, в сетях 6 ... 35 кВ с *ненормируемым* временем существования ОДЗ увеличение  $U_{\text{про}}$  до  $1,1 \cdot U_{\text{прс}}$  обезопасит ОПН от перегрева и пробоя.

Нужно отметить, что если в сети длительность существования ОДЗ регламентирована на уровне 2-6 час., и этот регламент реально выполняется, то может быть выбран ОПН с  $U_{\text{про}}$ , равным наибольшему рабочему напряжению сети.

В табл. 1, 2 приведены рекомендуемые значения  $U_{\text{про}}$  ограничителей перенапряжений для сетей с *ненормируемой* и ограниченной до 2-6 часов длительностью существования ОДЗ. В табл. 1 и 2 первое число –  $U_{\text{про}}$  ОПН для сетей с ограниченным временем существования ОДЗ, второе число –  $U_{\text{про}}$  ОПН в сетях с *ненормируемым* временем существования ОДЗ.

Остается выяснить, не приведет ли выбор ограничителей перенапряжений с  $U_{\text{про}} \approx 1,1 \cdot U_{\text{прс}}$  к опасному повышению остающихся напряжений на ОПН,

что снизит защиту изоляции до недопустимого уровня. Приведем расчет остающихся напряжений для ОПН с  $U_{\text{про}} = U_{\text{прс}}$ .

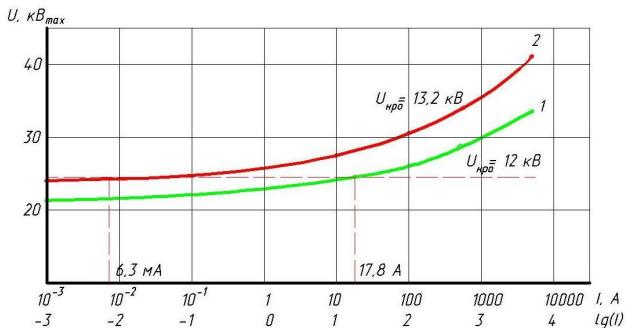


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики ОПН с  $U_{\text{про}} = 12$  кВ, номинальным разрядным током  $I_h = 5$  кА, током пропускной способности 500 А (кривая 1) и ОПН с  $U_{\text{про}} = 13,2$  кВ, номинальным разрядным током  $I_h = 5$  кА, током пропускной способности 500 А (кривая 2)

Таблица 1  
Рекомендуемые значения  $U_{\text{про}}$  для защиты силовых трансформаторов и реакторов (для уровня изоляции "а" и облегченной изоляции согласно ГОСТ 1516.3)

Нейтраль	Рекомендуемые значения $U_{\text{про}}$ , кВ, для нормальной изоляции с уровнем изоляции "а"				
	6 кВ	10 кВ	15 кВ	20 кВ	35 кВ
Изолированная или заземленная через ДГР	6,9 ... 8,0	11,5 ... 13,0	17,5 ... 20,0	23,0 ... 26,5	40,5 ... 43,0
Заземленная через высокоомный резистор (частично заземленная нейтраль)*	6,3 ... 7,3	10,5 ... 11,8	15,9 ... 18,2	20,9 ... 24,1	38,0 ... 40,5
Рекомендуемые значения $U_{\text{про}}$ , кВ, для облегченной изоляции					
Изолированная или заземленная через ДГР	6,9 ... 7,8	11,5 ... 13,0	17,5 ... 18,8	23,0 ... 26,0	–
Заземленная через высокоомный резистор (частично заземленная нейтраль)	6,3 ... 7,1	10,5 ... 11,8	15,9 ... 17,1	20,9 ... 23,6	–

\*для сетей с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор,  $U_{\text{про}}$  снижено на 10 %.

Таблица 2  
Рекомендуемые значения  $U_{\text{про}}$  для защиты изоляции аппаратов (для уровня изоляции "а" и облегченной изоляции по ГОСТ 1516.3)

Нейтраль	Рекомендуемые значения $U_{\text{про}}$ , кВ				
	для нормальной изоляции с уровнем изоляции "а" и облегченной изоляции				для нормальной изоляции с уровнем изоляции "а"
	6 кВ	10 кВ	15 кВ	20 кВ	35 кВ
Изолированная или заземленная через ДГР	6,9 ... 8,0	11,5 ... 13,0	17,5 ... 19,0	23,0 ... 25,2	40,5 ... 42,0
Заземленная через высокоомный резистор (частично заземленная нейтраль)*	6,3 ... 7,3	10,5 ... 11,8	15,9 ... 17,3	20,9 ... 22,9	38,0 ... 40,5

\*для сетей с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор,  $U_{\text{про}}$  снижено на 10 %.

Выбрав  $U_{\text{про}}$  из табл. 1, 2, можно найти расчетные остающиеся напряжения для коммутационных и грозовых перенапряжений  $U_{\text{ост.к}}$  и  $U_{\text{ост.г}}$  при нормируемых импульсных токах. Для грозовых перенапряжений нормируемым является номинальный разрядный ток  $I_h = 5000$  А с формой волны 8 / 20 мкс. При коммутационных перенапряжениях для ОПН 6 ... 35 кВ остающееся напряжение  $U_{\text{ост.к}}$  принято определять при нормированном токе  $I_{\text{норм.к}} = 500$  А с формой волны 30 / 60 мкс.

Расчетные значения остающихся перенапряжений на ОПН можно определять через коэффициенты "типовых кратностей" [3]. Коэффициенты типовых кратностей определяются отношением остающихся напряжений на ОПН к наибольшему длительно допустимому рабочему напряжению  $U_{\text{про}}$  (амплитудное значение):

$$K_{30/60} = \frac{U_{\text{ост.30/60}}}{U_{\text{про}}}, \quad (5)$$

$$K_{8/20} = \frac{U_{\text{ост.8/20}}}{U_{\text{про}}}. \quad (6)$$

Коэффициенты типовых кратностей для ОПН и варисторов различных номиналов и различных производителей с некоторым приближением могут быть приняты равными:

$$K_{30/60} = 1,75; K_{8/20} = 2,1.$$

Поэтому, расчетные значения остающихся перенапряжений на ОПН определим как:

$$U_{\text{ост.к}} = U_{\text{ост.30/60}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{про}} \cdot K_{30/60}, \quad (7)$$

$$U_{\text{ост.г}} = U_{\text{ост.8/20}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{про}} \cdot K_{8/20}. \quad (8)$$

В табл. 3 приведены расчетные значения  $U_{\text{ост.к}}$  и  $U_{\text{ост.г}}$  для ОПН с наибольшим рабочим напряжением  $U_{\text{про}} = 1,1 \cdot U_{\text{прс}}$  (числитель) и нормируемые уровни защи-

ты изоляции от перенапряжений  $U_{\text{заш.к}}, U_{\text{заш.г}}$  (знаменатель) для силовых трансформаторов и реакторов.

Таблица 3

Расчетные значения  $U_{\text{ост.к}}$  и  $U_{\text{ост.г}}$  для силовых трансформаторов и реакторов с наименьшим уровнем изоляции (для уровня изоляции "а")

Виды импульсных воздействий	Расчетные значения остающихся напряжений ОПН и нормируемые уровни защиты изоляции от перенапряжений, кВ <sub>max</sub>				
	6	10	15	20	35
Наибольшее рабочее напряжение $U_{\text{про, кВ}}$	6	10	15	20	35
При воздействии грозового импульса, $I_h=5 \text{ кА}, 8/20 \text{ мкс}$	<u>23,7</u> 27	<u>38,6</u> 45	<u>59,4</u> 61	<u>78,6</u> 80	<u>127,7</u> 130
При воздействии коммутационного импульса, $I_{\text{ном.к}}=500 \text{ А}, 30/60 \text{ мкс}$	<u>19,7</u> 31,2	<u>32,1</u> 43,7	<u>49,5</u> 59,3	<u>65,6</u> 78,1	<u>106,4</u> 125

Уровень защиты изоляции от коммутационных перенапряжений  $U_{\text{заш.к}}$  определялся по известному выражению [1]:

$$U_{\text{заш.к}} = K_{\text{износа}} \cdot K_{\text{имп.}} \cdot U_{\text{исп.1 мин.}} \cdot \sqrt{2},$$

где  $K_{\text{износа}} = 0,85$ ;  $K_{\text{имп.}} = 1,3$ ;  $U_{\text{исп.1 мин.}} \cdot \sqrt{2}$  – по ГОСТ 1516.3.

Уровень защиты изоляции электрооборудования 6 ... 35 кВ от грозовых перенапряжений  $U_{\text{заш.г}}$  координируется с остающимися напряжениями вентильных разрядников группы IV и группы III при токе координации 5 кА. По этой причине значения  $U_{\text{заш.г}}$ , указанные в табл. 3, были приняты в соответствии с нормативными документами [4].

Сравнивая расчетные значения  $U_{\text{ост.к}}$  и  $U_{\text{ост.г}}$  с нормируемыми уровнями защиты изоляции, можно убедиться, что повышение  $U_{\text{про}}$  до  $1,1 \cdot U_{\text{прс}}$  не приводит к нарушению принятого уровня координации как по коммутационным, так и по грозовым перенапряжениям.

Таким образом, при выборе ОПН для защиты электрооборудования от перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью 6 ... 35 кВ и ненормируемым временем существования ОДЗ выбор ОПН с наибольшим длительно допустимым рабочим напряжением на 10 % выше наибольшего рабочего напряжения сети ( $U_{\text{про}} = 1,1 \cdot U_{\text{прс}}$ ) обезопасит ОПН от перегрева и последующего пробоя варисторов.

Вопросы выбора других параметров ОПН для сетей 6 ... 35 кВ подробно изложены в нормативном документе СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-67:2012 [5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ. Методическое и справочное пособие. Под ред. М.А. Арагова. – М.: "Знак", 2001. – 240 с.
2. Екимуков С.С., Кадомская К.П. Обеспечение надежности эксплуатации кабельных распределительных сетей 6-10 кВ, оснащенных современным электрооборудованием // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Научный журнал. Специальный выпуск. №1. – С. 5-9.

3. Дмитриев М.В. Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ. – СПб.: "Нива", 2007.

4. ГКД 34.35.512-2002 Средства защиты от перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ. Инструкция по монтажу и эксплуатации. Отраслевой руководящий документ: ГРИФРЭ, Киев. – 2004.

5. СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-67:2012 Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ogranichiteli perenapryazhenij v `elektrostanovkah 6-750 kV. Metodicheskoe i spravochnoe posobie. Pod red. M.A. Aragova. - M.: "Znak", 2001. - 240 s. 2. Ekimukov S.S., Kadomskaia K.P. Obespechenie nadezhnosti `ekspluatacii kabel'nyh raspredelitel'nyh setej 6-10 kV, osnaschennyh sovremennym `elektrooborudovaniem // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. Nauchnyj zhurnal. Special'nyj vypusk. №1. - S. 5-9. 3. Dmitriev M.V. Primenie OPN v `elektricheskikh setyah 6-750 kV. - SPb.: "Niva", 2007. 4. GKD 34.35.512-2002 Sredstva zaschity ot perenapryazhenij v `elektrostanovkah 6-750 kV. Instrukciya po montazhu i `ekspluatacii. Otraslevoj rukovodysachij dokument: GRIFR'E, Kiev. - 2004. 5. SOU-N MEV 40.1-21677681-67:2012 Obmezhuvachi perenaprug nelinijnji naprugoyu 6-35 kV. Nastanova schodo viboru ta zastosuvannya u rozpodil'chih ustanonovah.

Поступила 01.04.2013

**Шумилов Ю.Н., д.т.н., проф.,**  
Государственное предприятие "Научно-исследовательский институт высоких напряжений"  
84100, Славянск, Донецкая обл.,  
ул. Генерала Батюка, 22  
тел. (0626) 650653, факс (0626) 65-09-18  
e-mail: science@niivn.dn.ua

*Shumilov Yu. N.*

**Aspects of surge arresters' maximum operating voltage choice for electrical equipment insulation protection in 6 ... 35 kV mains.**

The paper shows that, in 6 ... 35 kV mains, application of a non-linear surge arrester (SA) with the maximum continuous admissible operating voltage which is 10% higher than the mains' maximum operating voltage results in the SA protection from overheating and subsequent breakdown at nonnormable lifetime of single-phase arc faults.

**Key words – non-linear surge arrester, insulation, arc fault.**

## ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНА СПРОМОЖНІСТЬ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ В РЕАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

*Виконано аналіз результатів розрахунку перевантажувальної спроможності традиційних силових кабелів на напругу 6 кВ. Робота направлена на створення системи розрахунку допустимого струму високовольтних силових кабелів із змішаною поліетиленовою ізоляцією.*

*Выполнен анализ результатов расчетов перегрузочной способности силовых кабелей на напряжение 6 кВ. Работа направлена на создание системы расчета допустимого тока высоковольтных силовых кабелей со смешанной полиэтиленовой изоляцией.*

**Постановка проблеми.** Спроможність силових кабелів до навантаження та перевантаження (в подальшому – пропускна спроможність) визначають за нормативних умов експлуатації [1, 2]. В реальних системах електроспоживання умови експлуатації можуть суттєво відрізнятись від нормативних і, що важливо, в першу чергу не в сенсі параметрів оточуючого середовища, а відповідно до режиму навантаження і можливих нестационарних режимів роботи конкретної системи. Інформація щодо спектру можливих нестационарних режимів використання силових кабелів в конкретних системах електроспоживання, яка сьогодні є вкрай обмеженою і стосовно традиційних конструкцій кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією, і для інноваційних конструкцій, – відсутня. Саме встановлення спектру можливих нестационарних режимів використання силових кабелів в конкретних системах електроспоживання є необхідною складовою забезпечення безаварійної роботи систем споживання електричичної енергії.

Методи визначення пропускної спроможності інноваційних конструкцій силових кабелів в режимах реальної експлуатації вимагають, щонайменше, перевірки і розрахунком, і експериментально. В першу чергу порівняно із традиційними кабелями.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Пропускна спроможність силових кабелів визначається процесами тепла і масообміну в них за номінальних умов експлуатації [2]. Доцільно при визначенні перевантажувальної спроможності кабелів використовувати найбільш відомі розрахункові моделі, а саме експоненційну модель нагрівання кабелю та її похідні за різних начальних умов [3]:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot [1 - \exp(-t/\beta)], \quad (1)$$

де за  $t = 0$ ;  $\tau = 0$  (включення в експлуатацію),

$$\tau = \tau_{\max} \cdot [1 - \exp(-t/\beta)] + \tau_1 \cdot \exp(-t/\beta), \quad (2)$$

де за  $t = 0$ ;  $\tau = \tau_1$  (експлуатація),

$$\tau = \tau_1 \cdot \exp(-t/\beta), \quad (3)$$

де за  $t = 0$ ;  $\tau = \tau_1$ ; (режимі охолодження);

де  $\beta$  – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності кабелю на його тепловий опір  $\beta = C \cdot S$  і яка є параметром, що відображає кінетику нагрівання кабелю. Ця модель є наблизеною. Досвід її застосування свідчить про прийнятну для практичних задач точність за умови, що за їх допомогою порівнюють характеристики подібних конструкцій кабелів. В [4] співставлено застосування цих моделей з результатами застосування методу зосереджених теплоємностей у вигляді суми двох експонент:

$$\tau = P \cdot \left[ S_g \cdot (1 - e^{-gt}) + S_f \cdot (1 - e^{-ft}) \right], \quad (4)$$

де  $g, f$  – постійні складові кінетики нагрівання кабелю.

В [4] показано, що високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією відомі розрахункові моделі (1) – (4) дають практично однакові результати щодо **визначення тривало допустимого струму**, але для визначення перевантажувальної спроможності таких кабелів необхідна перевірка і розрахунок, і експериментально. В першу чергу порівняно із традиційними кабелями.

**Ціль і задачі дослідження.** Порівняти в різних нестационарних режимах експлуатації характеристики перевантажувальної спроможності традиційних конструкцій кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією на напругу 6 кВ, що використані в конкретній типовій системі електроспоживання. На основі такого порівняння проаналізувати спектр можливих нестационарних режимів використання силових кабелів в цій системі з метою забезпечення її безаварійної роботи.

**Основний матеріал дослідження.** За типову систему електроспоживання вибрано компресорну станцію підприємства, яка живиться від двох розподільчих підстанцій системи електропостачання (див. рис. 1), які забезпечують лінійну напругу трьохфазної системи 6,3 кВ. В нормальному режимі експлуатації дві лінії живлення, що належать підприємству, є автономними. В разі потреби (наприклад, відмови постачання від однієї з підстанцій) вся компресорна станція підприємства живиться від однієї з двох ліній. Така система живлення забезпечує значно більшу надійність електропостачання компресорної станції.

Компресорна станція складається з чотирьох поршневих компресорів 2ВГ, які забезпечують тиск в системі від 0,63 МПа до 0,64 МПа. Компресори працюють безперервно, кожен від синхронного двигуна ДСК на напругу 6 кВ і повну потужність 740 кВА. Один двигун ДСК4 знаходиться в резерві. Довідковий добовий баланс втрат електроенергії компресорної станції [3] такий:

- втрати в кабельних лініях живлення 187 кВт·год;
- втрати в обмотках електродвигунів 810 кВт·год;
- втрати в магнітопроводах електродвигунів та механічні 980 кВт·год.

В сумі ці втрати становлять 4,72 % від усієї спожитої компресорною станцією електроенергії. Таким чином 95,28 % спожитої електроенергії використані безпосередньо за призначенням.

© Л.А. Щебенюк

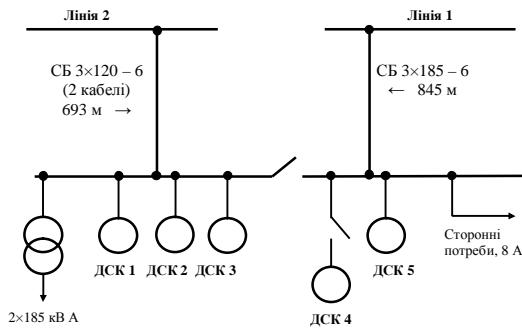


Рис. 1. Схема споживання електроенергії компресорної станції [3]

За нормального режиму роботи температура кабелю не перевищує оточуючу температуру більш як на  $2,5^{\circ}\text{C}$ , оскільки відповідно до гранично допустимого номінального струму (400 А) кабель загружено лише на 20 % ( $79 \text{ A} / 400 \text{ A} \approx 0,2$ ).

В разі відмови лінії 2 виникає аварійний режим із струмовим перевантаженням кабелю СБ 3x185 – 6 на 10 %. В такому режимі температура кабелю зростає (крива 2 на рис. 2) і якщо такий режим триває необмежено довго, то температура перевищить критичне для цього кабелю значення  $80^{\circ}\text{C}$ . Тому допустимий час аварійного режиму обмежений ориєнтовно двома годинами (див. рис. 2). Важливо те що перевантажувальна спроможність кабелю впродовж цих двох годин є, але вона різна для різних моментів впродовж цих годин.

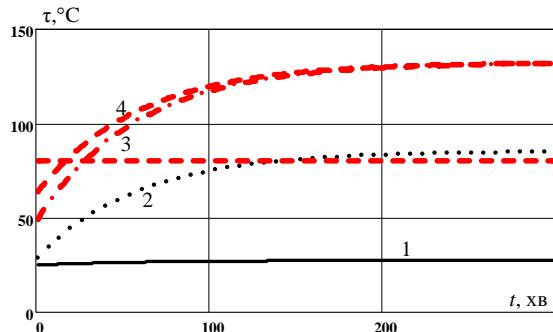


Рис. 2. Динаміка нагрівання кабелю СБ 3x185 – 6 за різних режимів навантаження: 1 – нормальній режим роботи (20 % допустимого струму); 2 – якщо відмовила лінія 2; 3 – якщо відмовила лінія 2 і через 20 хвилин виникло перевантаження на 10 %; 4 – якщо відмовила лінія 2 і через 1 годину виникло перевантаження на 10 %

Наприклад, якщо через 20 хвилин аварійного режиму виникло перевантаження на 10 %, то його тривалість не має перевищувати півгодини (див. криву 3 на рис. 2). Саме за такий час температура кабелю досягне критичного значення. Якщо ж через 40 хвилин аварійного режиму виникло перевантаження на 10 %, то його тривалість не має перевищувати 10 хвилин (див. криву 4 на рис. 2).

Відповідну інформацію зображують у вигляді кривих перевантажувальної спроможності – залежностей коефіцієнту перевантаження ( $K_{\text{пер}} = I_{\text{пер}}/I_{\text{ном}}$ ) від допустимого часу перевантаження  $t_{\text{пер}}$ :  $K_{\text{пер}} = f(t_{\text{пер}})$  [2].

Такі криві перевантажувальної спроможності для кабелю СБ 3x185 – 6 за різних режимів попереднього навантаження наведено на рис. 3. Цей рисунок ілюст-

рує, по-перше, значну залежність перевантажувальної спроможності кабелю від попереднього нагрівання. По-друге, недостатню чутливість такого способу постачі інформації до нагрівання кабелю, особливо при відносно великих значеннях  $t_{\text{пер}}$ , що зумовлене експоненційним наближенням коефіцієнту перевантаження до одиниці. А саме збільшення температури кабелю зумовлює і зростання втрат в ньому, і деградацію його ізоляції, і значне зменшення кисневого індексу пластмас із збільшенням температури (див. рис. 4).

Тому для аналізу перевантажувальної спроможності силових кабелів доцільне використання кривих нагрівання за різних режимів експлуатації в конкретних системах електропотреблення.

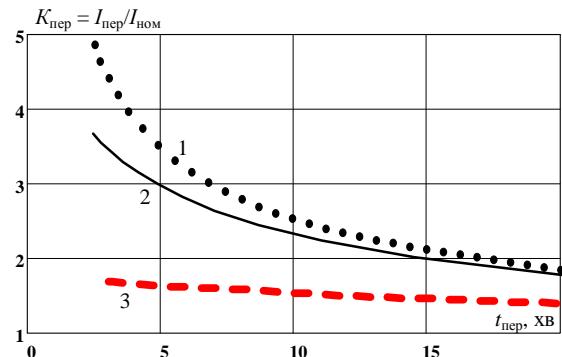


Рис. 3. Криві перевантажувальної спроможності, – залежності коефіцієнту перевантаження ( $K_{\text{пер}} = I_{\text{пер}}/I_{\text{ном}}$ ) від допустимого часу перевантаження для кабелю СБ 3x185 – 6 за різних режимів попереднього навантаження: 1 – нормальній режим роботи (20 % допустимого струму); 2 – якщо відмовила лінія 2; 3 – якщо відмовила лінія 2 і через 20 хвилин виникло перевантаження на 10 %

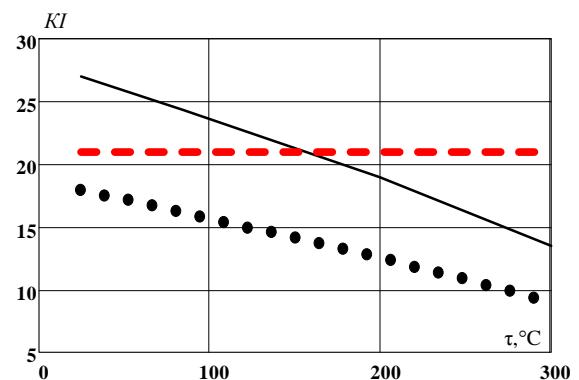


Рис. 4. Характерні криві зменшення кисневого індексу  $KI$  кабельних пластмас при підвищенні температури: суцільна крива – полівінілхлоридний пластикат; пунктир – поліетилен; штрихова пряма – вміст кисню у повітрі за нормальніх умов

Оскільки традиційні криві перевантажувальної спроможності силових кабелів у вигляді залежностей коефіцієнту перевантаження  $K_{\text{пер}} = f(t_{\text{пер}})$  [2], де  $K_{\text{пер}} = I_{\text{пер}}/I_{\text{ном}}$ ,  $t_{\text{пер}}$  – допустимий час перевантаження, значно відрізняються залежно від попереднього нагрівання (див. рис. 3), доцільно при їх визначенні враховувати таку залежність. Відповідна розрахункова модель, що базується на відомому співвідношенні (2), запропонована як універсальна модель для характеристики перевантажувальної спроможності силового кабелю в конкретній системі електропотреблення (див. рис. 5):

$$K_{\text{пер}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{пер}}}{\beta}\right)} \cdot \left[ 1 - \frac{\tau_{\max} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{пер}}}{\beta}\right) + \tau_{\max n} \cdot \exp\left(\frac{-t_{\text{пер}}}{\beta}\right) \right]}{\tau_{\max}} \right]}, \quad (5)$$

де  $\beta$  – постійна нагрівання кабелю,  $\beta = C \cdot S$ ;  $C$  – ефективна теплоємність кабелю [2];  $S$  – сумарний опір тепловому потоку, який відводиться в оточуюче середовище в конкретних умовах експлуатації;  $\tau_{\max}$  – максимальний перегрів кабелю за необмежено тривалого режиму перевантаження;  $\tau_{\max n}$  – максимальний перегрів кабелю за необмежено тривалого номінального режиму.

$$K_{\text{пер}} = I_{\text{пер}}/I_{\text{ном}}$$

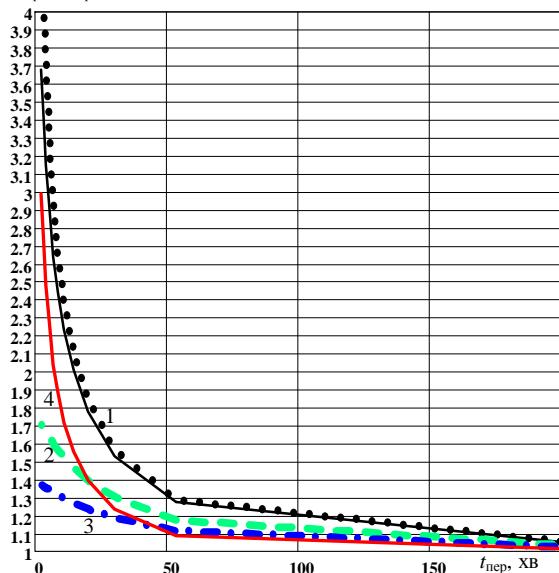


Рис. 5. Криві перевантажувальної спроможності кабелю СБ 3×185 – 6 (рис. 3): 1 – нормальній режим роботи (20 % допустимого струму); 2 – якщо відмовила лінія 2; 3 – якщо відмовила лінія 2 і через 20 хвилин виникло перевантаження на 10 % ; 4 – крива, розрахована за (5)

Модель (5) дає інформацію про перевантажувальну спроможність силового кабелю СБ 3×185 – 6 для будь-якого моменту від початку аварійного режиму за якого відмовила лінія 2. Відповідна крива (крива 4 на рис. 5) складається з точок, які позначають гранично допустимий коефіцієнт перевантаження  $K_{\text{пер}}$  впродовж гранично допустимого часу  $t_{\text{пер}}$  після роботи впродовж  $t_{\text{пер}}$  в даному аварійному режимі. Вона є геометричним місцем точок, що належать сімейству традиційних кривих перевантажувальної спроможності в цьому режимі (на рис. 5 криві 1-3).

Сімейство кривих, побудованих за допомогою моделі (5), може бути використане як практично застосовна номограма перевантажувальної спроможності даного силового кабелю в конкретній системі електроспоживання за характерного для цієї системи аварійного режиму експлуатації. Використання на практиці такої, побудованої заздалегідь, номограми є заходом, який може запобігти перевищенню заданої критичної температури кабелю, а отже виникненню пожеженебезпечної ситуації в характерному для цієї системи аварійного режиму експлуатації.

Важливо те, що критична температура може бути задана. Відповідно може бути проаналізовано економі-

чні втрати за рахунок підвищення температури кабелю. Так в розглянутому прикладі за нормального режиму роботи добові втрати в кабельних лініях живлення становлять 187 кВт·год, а в будь-якому аварійному режимі, обмеженому кривою 4 на рис. 5, добові втрати тільки в кабельній лінії 1 (критична температура 80 °C) становлять 1619 кВт·год, що перевищує всі втрати електроенергії в компресорній станції [3] і різко змінює електробаланс цього підрозділу підприємства.

### Висновки.

1) Запропоновано модель визначення гранично допустимого коефіцієнту перевантаження  $K_{\text{пер}}$  впродовж гранично допустимого часу  $t_{\text{пер}}$  після роботи впродовж  $t_{\text{пер}}$  в даному аварійному режимі силового кабелю, яка основана на обмеженні заданої критичної температури кабелю в конкретній системі електроспоживання.

2) Запропонована модель встановлює спектр можливих нестационарних режимів використання кабелю в конкретних системах електроспоживання і є необхідною складовою запобігання виникнення пожеженебезпечної ситуації в характерному для цієї системи аварійного режиму експлуатації.

3) Аналіз економічних втрат за рахунок підвищення температури кабелю до заданої критичної температури свідчить про те, що запропонована модель дає змогу оцінити зміну електробалансу відповідного підприємства в заданому аварійному режимі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- ДСТУ IEC60287-1-1:2012. Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1-1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коєфіцієнт навантаження 100 %) і обчислення втрат . Загальні положення.
- Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А. , Антонец' Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ, 2000. – С. 3.
- Справочник по електроснабженню и электрооборудованию. М: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. DSTU IEC60287-1-1:2012. Kabeli elektrichni. Obchislennya nominal'noi sili strumu. Chastina 1-1. Spivvidnoshennya dlya obchislennya nominal'noi sili strumu (koeficient navantazhenyya 100 %) i obchislennya vtrat . Zagal'ni polozeniya. 2. Karpushenko V.P., Schebenyuk L.A. , Antonec' Yu.O., Naumenko O.A. Silovi kabeli niz'koi ta seredn'oii naprugi. Konstruyuvannya, tehnologiya, yakist'. Harkiv: Region-Inform, 2000. - C. 3. 3. Spravochnik po `elektrosnabzhenyu i `elektrooborudovaniyu. M: `Energoatomizdat, 1986. - 568 s.

Надійшла 22.05.2013

Л.А. Щебенюк, к.т.н., проф.

Національний техніческий університет

"Харківський політехнічний інститут"

кафедра "Електрополімерна та кабельна технологія"

61002, Харків, ул. Фрунзе, 21

тел. (057) 7076663

Szhebenyuk L.A.

**Overload capability of power cables in actual power consumption systems.**

Results of overload capability calculations for 6-kV power cables are analyzed. The work is aimed at creating a computation system for the current rating of high-voltage cross-linked polyethylene power cables.

**Key words – overload capability, power cables, cross-linked polyethylene insulation.**