



## **ЗМІСТ**

### ***Електротехніка. Визначні події. Славенні імена***

|                     |  |           |
|---------------------|--|-----------|
| <b>Баранов М.И.</b> | Антология выдающихся достижений в науке и технике.<br>Часть 13: Нанотехнологии | <b>3</b>  |
| <b>Савич Э.В.</b>   | Тайна шаровой молнии   | <b>14</b> |
| <b>Савич Э.В.</b>   | Четвертое состояние воды   | <b>19</b> |

### ***Електричні машини та апарати***

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| <b>Василів К.М.</b>   | Аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку і спільним з'єднанням фаз модулятора під час роботи на вузол асинхронних двигунів | <b>23</b> |
| <b>Дегтев В.Г.</b>  | Гармонический анализ дробных обмоток   | <b>29</b> |
| <b>Сидорец В.Н.,<br/>Жерносеков А.М.,<br/>Пентегов И.В.,<br/>Петриенко О.И.</b> | Особенности расплавления электрода при дуговой сварке сталей   | <b>34</b> |
| <b>Чабан В.Й.,<br/>Чабан О.В.</b>   | Рівняння несиметрії вузла живлення електромоторів при фазному короткому замиканні  | <b>38</b> |

### ***Силова електроніка***

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| <b>Жемеров Г.Г.,<br/>Тугай Д.В.,<br/>Титаренко И.Г.</b> | Моделирование электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения | <b>40</b> |
|---|--|-----------|

### ***Техніка сильних електричних та магнітних полів***

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| <b>Аргун Щ.В.</b>  | Особенности в работе систем источника мощности – генератора многократных токовых импульсов   | <b>48</b> |
| <b>Баранов М.И.,<br/>Колиушко Г.М.,<br/>Кравченко В.И.</b> | Получение стандартных коммутационных аperiodических импульсов высокого и сверхвысокого напряжения для натуральных испытаний электроэнергетических объектов | <b>52</b> |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| <b>Безпрозваних Г.В.,<br/>Бойко А.М.,<br/>Кессаєв О.Г.</b> | Вплив конструктивних та технологічних неоднорідностей на хвильовий опір коаксіальних радіочастотних кабелів                           | <b>57</b> |
| <b>Гнатов А.В.</b>   | Новое направление в МИОМ, связанное с притяжением тонкостенных листовых металлов. История и перспективы развития                      | <b>62</b> |
| <b>Трунова И.С.</b>  | Исследование электромагнитных процессов в совмещенном согласующем устройстве цилиндрического типа с массивным одновитковым индуктором | <b>68</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 перереєстровано 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 (ВИНИТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВИНИТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВИНИТИ. Згідно з цим договором ВИНИТИ надає редакції журналу звіт про відображення статей з журналу у РЖ та БД ВИНИТИ.*

*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.mon.gov.ua> в розділі «Інформаційні ресурси / Наукова періодика України» починаючи з 2005 року.*

*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)) та в системі BASE ([www.base-search.net](http://www.base-search.net)).*

*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.*

М.И. Баранов

## **АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 13: НАНОТЕХНОЛОГИИ**

*Наведено короткий науково-історичний нарис про сучасний стан досліджень в галузі нанотехнологій і досягнень у них, що знайшли застосування в різних галузях науки і техніки.*

*Приведен краткий научно-исторический очерк о современном состоянии исследований в области нанотехнологий и достижениях в них, нашедших применение в различных областях науки и техники.*

*"Кто раньше овладеет нанотехнологиями, тот и займет ведущее место в техносфере будущего".*

*Эдвард Теллер (1908-2003 гг.) – один из "отцов" американской термоядерной бомбы.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Согласно [1] "**технологией**" называется совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции. Составная часть наименования единиц физических величин "**нано**", равная  $10^{-9}$  (миллиардной) доле исходных единиц, происходит от греческого слова "*nanos*" – "*карлик*" [1]. Принято считать, что впервые термин "**нанотехнология**", объединяющий указанные выше два понятия (те, что в кавычках), применил азиатский ученый Норио Танигути в 1974 году, использовавший его для обозначения производства супермалых изделий размером в несколько нанометров [2]. Поэтому в этом научно-историческом очерке, посвященном молодой науке, способной стать основой новой промышленной революции в мире, начнем с определения понятия "нанотехнология". Согласно [2, 3] под нанотехнологией следует понимать совокупность методов, обеспечивающих контролируемым образом создание и модификацию объектов с составными компонентами размером менее 100 нм (хотя бы в одном измерении), характеризующихся появлением из-за этого у них (объектов) принципиально новых качеств (свойств), и позволяющих осуществлять их (этих объектов) интеграцию в полноценно функционирующие системы большого масштаба (размера). Отметим, что практический аспект нанотехнологий включает в себя производство технических устройств и их компонентов, необходимых для создания, обработки и манипуляции атомами, молекулами и наночастицами, образующими указанные выше объекты. Причем, эти объекты не обязательно должны быть по размеру менее 100 нм. В качестве них могут выступать макрообъекты, атомарная структура которых либо контролируется создается человеком (роботом) с разрешением на уровне отдельных атомов, либо же содержит в себе отдельные нанообъекты. Рассматриваемое понятие охватывает также методы диагностики, характеристики и физических исследований таких объектов. Нанотехнология и в особенности ее главная составная часть – молекулярная технология являются новыми и мало исследованными на настоящее время научно-техническими дисциплинами, сформировавшимися в науке фактически за последние 20 лет [4]. Эти дисциплины принципиально отличаются от традиционных и хорошо изученных дисциплин и отраслей научно-технических знаний, использующих макроскопические подходы и технологии обращения с веществом. Так, если для

макрообъектов силы взаимодействия атомов и молекул вещества или силы Ван-дер-Ваальса, названные в честь автора их открытия – выдающегося нидерландского физика Иоханнеса Ван-дер-Ваальса (1837-1923 гг.), и квантовые эффекты не играют заметной роли и ими ученые зачастую просто пренебрегают, то для нанообъектов они становятся существенными и определяющими их физико-химические свойства. Использование в нанотехнологиях передовых научных достижений позволяет относить их к высоким технологиям. Разработка, синтез и практическое применение во многих наукоемких отраслях техносферы наноструктурных материалов (наноматериалов) и наноустройств становится сейчас важной составляющей мирового научно-технического прогресса [4].

### **1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О НАНОТЕХНОЛОГИЯХ И ИХ ИНСТРУМЕНТАРИИ**

Нанотехнология как новая междисциплинарная область фундаментальной и прикладной науки и техники изучает закономерности физико-химических процессов в пространственных областях нанометровых размеров с целью управления отдельными атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами [2, 3]. Поэтому главной особенностью нанотехнологии является то, что рассматриваемые процессы и совершаемые действия в ней происходят в нанометровом диапазоне пространственных размеров. "Сырьем" в этой технологии являются отдельные атомы, молекулы, молекулярные системы, а не привычные в традиционной технологии микронные или макроскопические объемы материала, содержащие миллионы и миллиарды атомов и молекул. Работать "вслепую" с подобным "сырьем" – нанообъектами, как мы все прекрасно понимаем, нельзя. Для манипуляции и управления атомами, молекулами и наночастицами со стороны макромира, в котором находятся изучаемые их ученые и специалисты-нанотехнологи, последним как "воздух" был необходим соответствующий физический инструментарий. Заметим, что в 1986 году известный немецкий физик Эрнст Руска (1906-1988 гг.) за фундаментальные работы по электронной оптике и созданию им еще в 1931 году первого просвечивающего электронного микроскопа стал лауреатом Нобелевской премии по физике [5]. Именно здесь и сказала свое весомое научно-техническое "слово" передовая область электронной микроскопии – сканирующая туннельная и зондовая микроскопия [2, 3].

Значительную роль в неудержимом исследовании человечеством полного тайн наномира сыграли выдающиеся технические изобретения американских ученых и

© М.И. Баранов

инженеров – создание сканирующего (растрового) туннельного микроскопа (G. Binnig, G. Rohrer, 1982 год), разработчики и создатели которого (Г. Биннинг и Г. Рорер) были удостоены Нобелевской премии по физике за 1986 год, и сканирующего атомно-силового микроскопа (G. Binnig, K. Kuatt, K. Gerber, 1986 год) [2, 5]. Изобретение новых микроскопов подобного типа позволило уверенно наблюдать и исследовать ученым-физикам и химикам атомно-молекулярную структуру поверхности монокристаллов в нанометровом диапазоне размеров. Наилучшее пространственное разрешение этих физических приборов составляет сотую долю нанометра (при размере атома в десятую долю нанометра [6]) по нормали к изучаемой поверхности вещества. Отметим, что действие сканирующего туннельного микроскопа основано на туннелировании свободных электронов через вакуумный барьер исследуемого вещества [2, 3]. Высокая разрешающая способность в них (этих микроскопах) обусловлена тем, что туннельный электронный ток изменяется в монокристалле вещества на три порядка при изменении ширины данного барьера на размер атома, примерно равный 0,1 нм. Следует заметить, что теория квантового эффекта туннелирования электронов в веществе была заложена выдающимся американским (русским) физиком-теоретиком Георгием Антоновичем Гамовым (1904-1968 гг.) в 1928 году в его работах по радиоактивному  $\alpha$ -распаду [2, 5]. Применив квантовую механику к объяснению  $\alpha$ -распада, Г.А. Гамов показал, что микрочастицы даже с не очень большой энергией могут с определенной вероятностью проникать через потенциальный энергетический барьер. С помощью сканирующих микроскопов в настоящее время ученые наблюдают за атомной структурой поверхностей монокристаллов металлов, полупроводников, высокотемпературных сверхпроводников, органических молекул и биологических объектов. Новые микроскопы оказались весьма полезными не только при изучении атомно-молекулярной структуры вещества, но и пригодными для непосредственного конструирования наноструктур. Сканирующая зондовая микроскопия, использующая как оптические, так и неоптические методы исследования, нашла широкое применение при изучении и построении нанобъектов. На рис. 1 приведен внешний вид подготавливаемого к работе сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) атомного разрешения, установленного недавно в Институте металлофизики НАН Украины [7, 8]. Укажем, что работа СЗМ основана на взаимодействии иглы кантилевера (зонда) с поверхностью исследуемого нанобъекта.

С помощью определенных движений иглой (зондом) такого микроскопа удается создавать атомные структуры. На рис. 2 представлены последовательные этапы создания нанотехнологом логотипа всемирно известной американской компьютерной компании "IBM" из отдельных атомов ксенона Xe на грани монокристалла никеля Ni [2]. При этом движения острия-наконечника СЗМ по грани монокристалла вещества при создании наноструктур из отдельных атомов напоминают хорошо знакомые каждому из нас приемы хоккеиста при продвижении им по льду шайбы с помощью клюшки. В этой связи для нанотехнологий особый интерес представляет создание компьютерных программ и математических алгоритмов, устанавливающих нетривиальную связь между движениями острия (зонда) сканирующего микроскопа и перемещениями манипулируемых атомов и молекул вещества на основе

соответствующих математических моделей. Математические модели и алгоритмы необходимы здесь также и для работы автоматических "сборщиков" (нанороботов) различных наноконструкций.

Исследования свойств поверхности вещества с помощью СЗМ можно проводить на воздухе при атмосферном давлении, в вакууме и даже в жидкости. Рис. 3 иллюстрирует возможности СЗМ при исследовании молекулярного строения таких химических веществ как бензола (а) и полиэтилена (б) [2].

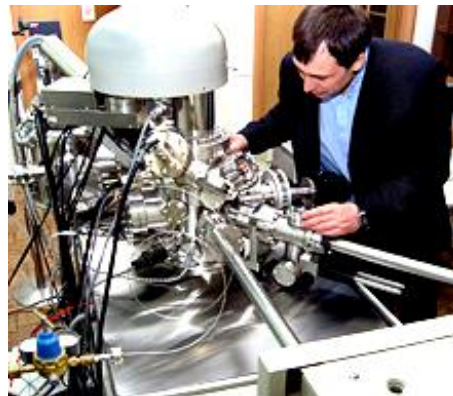


Рис. 1. Внешний вид элементов сканирующего зондового микроскопа Института металлофизики НАН Украины для комплексного исследования нанобъектов [8]

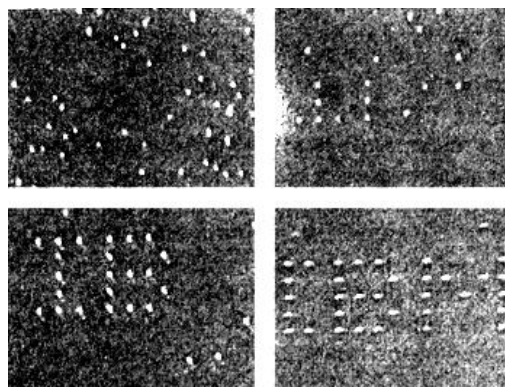


Рис. 2. Надпись "IBM" на грани (110) монокристалла никеля Ni из отдельных 35 атомов ксенона Xe, последовательно реализованная нанотехнологом при помощи зонда СЗМ [2]

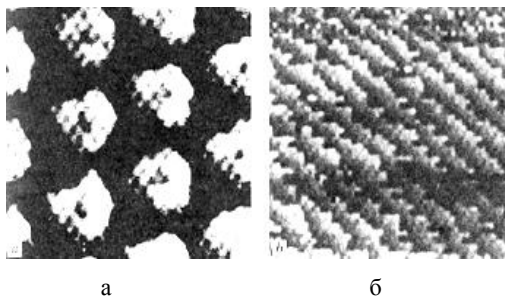


Рис. 3. Внешние виды отдельных молекул широко используемых химических веществ бензола (а) и полиэтилена (б), полученные на современном СЗМ [2]

Из данных рис. 3,а отчетливо видны объемные кольца упорядоченно размещенных молекул бензола  $C_6H_6$ , а из рис. 3,б – последовательно выстроенные  $CH_2$ -цепочки ("гребешки") полиэтилена. Интересным научно-историческим фактом является то, что открытие именно кольцевой структурной формулы бензола было произведено в 19-ом столетии извест-

ным немецким химиком А. Кекуле (1829-1896 гг.) [9]. Этот ученый интуитивно представил тогда углеродные цепи бензола в виде "змеи, кусающей себя за хвост". Так была открыта первая в мире кольцевая молекулярная формула вещества. Как видим, интуиция и воображение ученого-химика А. Кекуле не подвели. Отметим, что при помощи СЗМ не так давно был исследован процесс проникновения во времени вируса в живую биологическую клетку [2]. В ходе лабораторных исследований нанообъектов было установлено, что методы современной математической физики нуждаются в серьезном развитии и уточнении, учитывающем особенности нанообъектов [3].

## 2. ОСНОВНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ И НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Важной составляющей нанотехнологий, исследующих малоразмерные объекты в диапазоне от 1 до 100 нм, является разработка и синтез самих наноматериалов. На сегодняшний день в области нанотехнологий сформировалось два мощных направления в синтезе неорганических наноматериалов [4]. Первое направление – получение нанокристаллических материалов на основе ультрадисперсных частиц, которые условно можно назвать "*наноматериалами 1-го рода*". Этот род наноматериалов можно получать в замкнутых консервативных системах и процесс их получения может быть описан в рамках представлений классической термодинамики. Второе направление – получение синергетичных наноматериалов или "*наноматериалов 2-го рода*", изучаемых новой областью науки, называемой синергетика [4]. В этом случае процесс синтеза наноматериалов достигается в диссипативных системах и в экстремальных условиях, весьма далеких от термодинамического равновесия. При этом в материале возможно протекание сложных и малоизученных на сегодня самоорганизующих процессов, в результате которых возникают ранее не существовавшие в природе наноструктуры. Отметим, что в области нанотехнологий проблемой самоорганизующих процессов в нановеществе занимается супрамолекулярная химия [2, 3]. Данный раздел химии изучает не отдельные молекулы, а взаимодействия между молекулами, которые способны упорядочить молекулы вещества определенным способом, создавая новые материалы с новыми характеристиками.

*Наноматериалы 1-го рода* известны достаточно давно и нашли широкое применение в конце 20-го столетия в порошковой металлургии. Еще в 70-х годах прошлого века советский академик И.В. Тананаев впервые предложил дополнить классические диаграммы состояния вещества показателем (координатой) его дисперсности [4]. Их (этих материалов) новые физико-механические свойства базируются на известных размерных эффектах. Ведь с уменьшением размеров частиц вещества в замкнутой системе происходит увеличение их удельной поверхности, что приводит к увеличению свободной энергии системы при постоянных значениях температуры, давления и объема вещества. При этом в уравнение свободной энергии системы вводится дополнительное слагаемое, являющееся произведением коэффициента поверхностной энергии на величину прироста площади поверхности [4]. Вследствие чего в зависимости от степени дисперсности частиц вещества может изменяться температура его плавления или полиморфного фазового перехода. Оказалось, что значение удельной

поверхности частиц вещества резко возрастает по мере приближения их размеров к наномасштабному уровню. Связано это со значительным увеличением доли поверхностных атомов вещества по отношению к полному числу атомов, составляющих эти частицы. Многочисленные эксперименты показали, что уменьшение размеров частиц приводит не только к увеличению их удельной поверхности и свободной энергии, но и к изменению других физических и химических свойств материалов (например, магнитных, электрических, сверхпроводящих, механических, оптических, каталитических и др.) [4]. Опытным путем было установлено, что размерные эффекты для наноматериалов 1-го рода реализуются при геометрических размерах элементов структуры (зерен) конденсированной фазы вещества менее 100 нм [2-4]. Стало понятным, что отдельные (индивидуальные) наночастицы (рис. 4) отличаются и от свойств макроскопической фазы вещества и от свойств изолированных атомов (молекул) их (эти наночастицы) образующих.

Кроме того, выяснилась и другая важная особенность наночастиц – способность проявления ими новых свойств как в изолированном состоянии, так и в консолидированном состоянии при образовании вместе с другими наночастицами нанокристаллического материала [4]. Поэтому для наноматериалов 1-го рода роль среднего геометрического размера структуры того или иного нанокристаллического материала является главной и ключевой. Геометрический размер элемента внутренней наноструктуры (зерна или нанокристаллита) для этих представителей наноматериалов оказался соизмеримым с некоторыми хорошо известными в классической физике характеристическими размерными параметрами (например, с длиной  $\lambda_e$  свободного пробега электрона в твердом теле [10]).

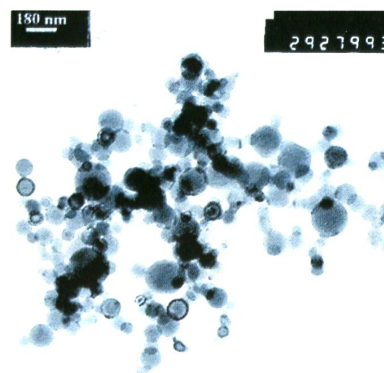


Рис. 4. Внешний вид представителей наноматериалов 1-го рода – ультрадисперсных наночастиц алюминия  $Al$ , полученный на СЗМ (слева сверху дан масштаб – 180 нм) [4]

Указанные выше физические представления стали на сегодня научно-технической основой для получения макроскопических кристаллических наноматериалов 1-го рода, предназначенных для практического конструкционного применения. Высокие физико-механические характеристики этих наноматериалов существенно зависят от геометрического размера образующих их зерен (кристаллитов). Отметим, что для получения таких наноматериалов используют [3, 4, 11]: компактирование нанопорошков методами порошковой металлургии; кристаллизацию объемных аморфных сплавов; интенсивную пластическую деформацию; явление электрического взрыва металли-

ческих проводников; различные методы нанесения на подложку наноструктурных покрытий. Следует указать, что к настоящему времени за счет создания объемных нанокристаллических структур и применения наноматериалов 1-го рода существенно повышены свойства ряда конструкционных материалов для машиностроения на базе сталей, алюминиевых сплавов, титана и его сплавов, керамик и интерметаллидов [2, 4]. Этот вид наноматериалов нашел весьма широкое применение также при модификации поверхностей изделий машиностроения, когда нанесенные на них наноструктурные покрытия выполняют антикоррозионные, упрочняющие и декоративные функции.

**Наноматериалы 2-го рода** радикально отличаются от наноматериалов 1-го рода как по свойствам, так и по своему внутреннему построению. Данные материалы не только имеют ультрадисперсную внутреннюю структуру, но и в ряде случаев порядок укладки в них атомов вещества не имеет аналогов в природе. Учеными было установлено, что наноматериалы 2-го рода могут возникать в диссипативных системах при одновременном выполнении следующих четырех условий [4]: во-первых, используемая для их получения система должна быть термодинамически открытой (в этой системе должны происходить процессы обмена энергией и веществом с окружающей внешней средой); во-вторых, рассматриваемая система должна быть существенно нелинейной (процессы в этой системе должны описываться нелинейными уравнениями состояния вещества); в-третьих, в данной системе отклонение от равновесия должно превышать некоторое критическое значение; в-четвертых, происходящие в указанной системе макроскопические процессы должны происходить согласованно. Особое место в этом классе наноматериалов занял исходный и хорошо всем нам известный материал – **графит** (углерод)  ${}^6_{12}\text{C}$  [3, 6]. При измельчении графита тем или иным способом можно получить графитовый нанопорошок. Наночастицы и нанокристаллы такого порошка будут унаследовывать кристаллическую структуру макрографита (массивного куска графита), из которого их получили. Из нанопорошкового графита можно методами порошковой металлургии спечь массивный наноструктурный графит с новыми физико-механическими свойствами. Но этого, как установили ученые-нанотехнологи, можно и не делать. Как оказалось на практике уникальными свойствами обладает наноматериал, созданный на основе одного графитового слоя (одного слоя атомов графита). Эта супертонкая пленка (толщиной порядка 0,1 нм) получила название "**графен**" [3, 4]. Впервые графен был получен в октябре 2004 года в исследовательской лаборатории Манчестерского университета (Англия). Графен физически стабилен, гибок, механически прочен и проводит элементарные носители электричества – свободные электроны, обуславливающие в нем электрический ток проводимости. Причем, электрические свойства графена оказались весьма необычными. В прошлом российскими учеными-физиками Андреем Геймом и Константином Новоселовым было обнаружено замечательное свойство графена – способность изменять свое электрическое сопротивление при приложении к нему электрического поля [13]. По мнению многих зарубежных ученых обнаруженное свойство графена открывает в области электричества и преобразовательной техники новую

эру – эру графитовой полупроводниковой электроники [13]. На взгляд автора, такого замечательного электрического свойства от одной из форм химического элемента углерода  ${}^6_{12}\text{C}$  прогнозировать следовало бы и ожидать. Ведь этот элемент принадлежит к четвертой группе периодической системы элементов Д.И. Менделеева, где расположены такие широко известные полупроводниковые материалы как кремний  $\text{Si}$  и германий  $\text{Ge}$  [6, 14]. Важно указать, что за получение двумерной графитовой пленки (графена) и экспериментальное изучение ее свойств наши бывшие соотечественники А. Гейм и К. Новоселов были удостоены Нобелевской премии по физике за 2010 год [13]. Еще более удивительные физико-механические свойства графена проявляются при сворачивании его монокристалла по толщине супертонкой пленки в подобие "наносвитка" – **углеродной нанотрубки** (рис. 5).

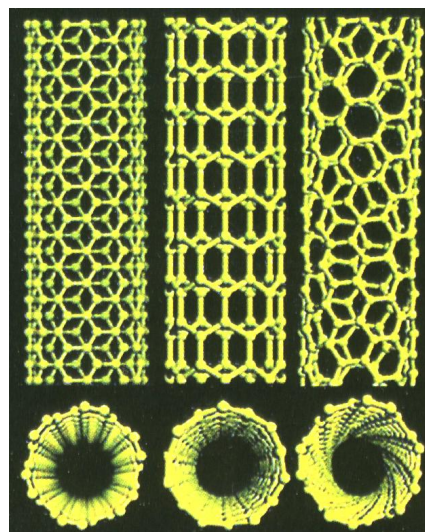


Рис. 5. Модели идеальных углеродных нанотрубок диаметром около 1 нм и длиной до 1 мм различной хиральности (вверху – вид сбоку, а внизу – вид с торца), открывших в науке и технике новый класс наноструктурных материалов – наноматериалов 2-го рода [4]

Заметим, что такие углеродные нанотрубки были впервые в мире синтезированы японским ученым-физиком С. Ишима [3, 4]. При этом они (эти углеродные трубки) были получены в термодинамически открытой электрофизической двухэлектродной системе с графитовыми электродами при дуговом электрическом разряде между ними в присутствии инертного газа аргона [2, 4]. Отметим, что углеродные нанотрубки стали первым синергетическим наноматериалом, полученным в диссипативной системе в условиях неравновесного фазового перехода в веществе. На рис. 6 приведен внешний аксонометрический вид изнутри модели идеальной углеродной нанотрубки.

Металлофизики и специалисты из области физики твердого тела установили, что углеродной нанотрубке нет места на равновесной фазовой диаграмме углерода  ${}^6_{12}\text{C}$  в координатах "давление – температура". Сложное пространственное строение подобных наноматериалов не описывается существующими представлениями и теориями современной классической кристаллографии. Этот феномен в физике твердого тела получил название "кристаллографической катастрофы" [4]. К настоящему времени в мире учеными-нанотехнологами экспериментально получено

достаточно много наноматериалов 2-го рода [3, 4]: многослойные углеродные нанотрубки; нанопроволоки; коллоидные микросферы; магические кластеры и спирали; луковичные структуры; наночастицы в виде "колеса" (рис. 7) и др.

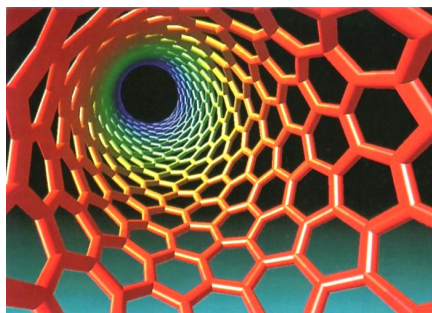


Рис. 6. Модель наноматериала 2-го рода – идеальной углеродной нанотрубки диаметром до 1 нм, толщиной стенки до 0,1 нм и длиной до 1 мм (вид изнутри данного нанообъекта, содержащего в стенке правильные шестиугольники) [4]

В настоящее время одним из наиболее перспективных наноматериалов 2-го рода в области нанотехнологий является тот, который базируется на углеродных наночастицах шарообразной структуры, получивших название "**фуллеренов**" [2-4, 12]. На рис. 8 представлен общий вид модели идеального фуллерена, содержащего 60 атомов углерода  ${}^6_{12}\text{C}$  и обозначаемого в нанотехнологии как  $\text{C}_{60}$ . Данные атомы в фуллеренах расположены на сфере с диаметром приблизительно в один нанометр, напоминающей мне как спортивному болельщику футбольный мяч. Фуллерены, как новая форма существования углерода  ${}^6_{12}\text{C}$  в природе наряду с давно известными его формами (алмазом и графитом) и к стати его единственная растворимая форма, были открыты (Н. Kroto, J. Heath, S. O'Brien, R. Curl, R. Smalley, 1985 год) при попытках астрофизиков объяснить спектры межзвездной пыли. Укажем здесь одну интересную научно-историческую деталь: упомянутый нами в [15] выдающийся немецкий (русский) математик и механик 18-го столетия Л. Эйлер в своих математических сочинениях (теоремах) в свое время показал, что атомы углерода в своих кристаллических построениях могут образовывать 12 правильных пятиугольников и 20 правильных шестиугольников [2]. Эти результаты математических исследований Л. Эйлера, как оказалось в дальнейшем (автор на этом примере еще раз убеждается в том, что как все в мире взаимосвязано!), имеют определенное отношение к названию рассматриваемого в этом подразделе наноматериала. Новая сферическая наномолекула-наночастица углерода  $\text{C}_{60}$  (фуллерен) была названа в честь архитектора Р. Фуллера, построившего жилой дом из пятиугольников и шестиугольников Эйлера [2, 12]. Учеными было установлено, что фуллерены могут вступать в химические реакции и образовывать самые различные новые и неизученные соединения с новыми физическими и химическими свойствами. Фуллерены также могут образовывать и различные полимеры. Отметим, что в 1990 году в мире была изобретена технология их (фуллеренов) крупномасштабного производства [2]. Важно отметить, что за экспериментальное открытие фуллеренов Карл Р., Крото Г. и Смолли Р. были удостоены Нобелевской премии по химии за 1996 год [5]. Наномоле-

кулы углерода  $\text{C}_{60}$ , в свою очередь, могут образовать кристалл **фуллерита** с гранцентрированной кубической решеткой и достаточно слабыми межмолекулярными связями [2].

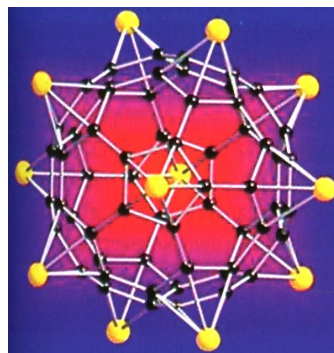


Рис. 7. Модель наночастицы вещества в форме "колеса", относящейся к наноматериалам 2-го рода [4]

В кристалле под названием фуллерит имеются октаэдрические и тетраэдрические полости, в которых могут находиться посторонние атомы (атомы примеси). Если октаэдрические полости в фуллерите заполнены положительно заряженными ионами щелочных металлов (например, калия  $K$ , рубидия  $Rb$ , цезия  $Cs$ ), то при температурах ниже комнатной (ниже  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ) внутренняя структура этих веществ перестраивается и образуется новый полимерный материал типа  $1\text{C}_{60}$ . Если заполнить в фуллерите и тетраэдрические полости, то образуется сверхпроводящий материал типа  $3\text{C}_{60}$  с критической температурой  $T_c$  в  $20\text{-}40\text{ K}$  [2]. Отметим, что в настоящее время активное изучение сверхпроводящих свойств фуллеритов проводится в Институте теоретической физики, носящем имя выдающегося немецкого физика-теоретика Макса Планка (1858-1947 гг.), в г. Штутгарте (Германия) [12].

Высокая мировая активность в области нанотехнологий и в стимулируемой ими новой области химии – супрамолекулярной химии, занимающейся разработкой, синтезом и исследованием наноматериалов 2-го рода, привела к тому, что уже к 1997 году в мире насчитывалось более 9000 разновидностей фуллереновых соединений [2,12]. В чем же заключается уникальность наноматериалов 2-го рода? Остановимся ниже вкратце лишь на трех их важных свойствах, указанных в [2]. **Первое свойство – механическая сверхпрочность.** Так как связи между атомами углерода  ${}^6_{12}\text{C}$  в тонком графитовом слое являются самыми сильными среди известных ученым, то бездефектные углеродные нанотрубки на два порядка будут прочнее трубок из металлической стали. При этом вдобавок они по весу будут примерно в четыре раза легче их стальных "сестер". В этой связи одной из важнейших задач нанотехнологии в области получения новых углеродных наноматериалов является создание нанотрубок неограниченной ("бесконечной") длины. Из таких углеродных нанотрубок можно будет изготавливать легкие композитные материалы предельной механической прочности для потребностей различной техники нового 21-го века, в том числе: силовых элементов мостов и иных технических сооружений, несущих конструкций летательных аппаратов (самолетов и ракетополетителей), силовых элементов турбин и двигателей с предельно малым удельным потреблением топлива и др.

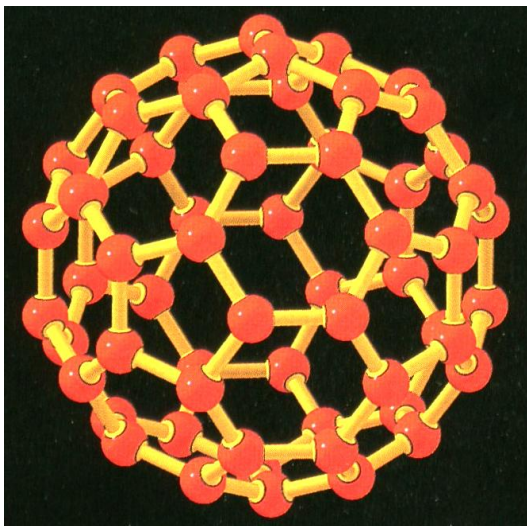


Рис. 8. Модель идеального фуллерена – яркого и перспективного представителя сферических углеродных наночастиц, образующих наноматериалы 2-го рода [4]

Заметим, что в настоящее время лучшие специалисты-нанотехнологи научились изготавливать углеродные нанотрубки длиной всего в сотни микрон (до 1 мм) при их диаметре порядка одного нанометра. **Второе свойство – высокая электрическая проводимость.** Известным в классической физике фактом является то, что в кристаллическом графите электрическая проводимость вдоль плоскости слоя наиболее высокая среди известных науке материалов, а в направлении, перпендикулярном данному слою, она мала. Поэтому в недалекой перспективе ожидается, что токонесущие части электрических кабелей, изготовленные из продольно ориентированных углеродных нанотрубок, при комнатной температуре в 20 °С будут иметь удельную электропроводность на два порядка выше, чем у кабелей с медными жилами и оболочками. А раз так, то и активное сопротивление таких электрических кабелей с проводящими наноматериалами и соответственно паразитные тепловые потери электроэнергии в них будут существенно меньше, чем у обычных кабелей с традиционными проводящими материалами (медью и алюминием). Дело здесь остается за нанотехнологией, позволяющей производить углеродные нанотрубки достаточной для указанных целей длины и в достаточном количестве. **Третье свойство – нанокластерность.** Во множестве нанообъектов присутствуют сверхмалые частицы – нанокластеры, состоящие из десятков, сотен и тысяч атомов. Оказалось, что свойства нанокластеров кардинально отличаются от свойств макроскопических объемов материалов того же состава. Выяснилось, что из нанокластеров, как из крупных строительных блоков, можно целенаправленно конструировать новые материалы с заранее заданными физико-механическими и химическими свойствами и использовать их в каталитических химических реакциях, а также для разделения газовых смесей и хранения различных газов. Большой интерес представляют магнитные нанокластеры, состоящие из атомов переходных металлов, лантиноидов и актиноидов. Эти нанокластеры обладают собственным магнитным моментом, что позволяет управлять их свойствами с помощью внешнего магнитного поля. Примером такого

нанокластера является высокоспиновая металлоорганическая молекула  $Mn_{12}O_{12}(CH_3COO)_{16}(H_2O)_4$ . Эта достаточно изящная в микроархитектуре молекулярная конструкция состоит из четырех ионов марганца  $Mn^{4+}$  со спином 3/2, расположенных в вершинах тетраэдра, и восьми ионов марганца  $Mn^{3+}$  со спином 2, окружающих этот тетраэдр. Взаимодействие между указанными ионами марганца осуществляется ионами кислорода. Антиферромагнитные взаимодействия спинов ионов  $Mn^{4+}$  и  $Mn^{3+}$  приводят к полному весьма большому спину для этого нанокластера, равному 10. Ацетатные группы и молекулы воды в этой сложной молекуле вещества отделяют нанокластеры  $Mn_{12}$  друг от друга в молекулярном кристалле. Взаимодействие этих нанокластеров в рассматриваемом кристалле чрезвычайно мало. Наномагниты представляют интерес, прежде всего, для проектирования процессоров, используемых в квантовых компьютерах. Учитывая, что расстояние между указанными молекулами составляет около 10 нанометров, то плотность памяти в такой атомной системе может быть порядка 10 Гбайт на один см<sup>2</sup> [2]. Дополнительно к этому укажем тот важный научный факт, что в 2007 году Питер Грюнберг и Альберт Ферт получили Нобелевскую премию по физике за открытие и изучение GMR-эффекта (эффекта гигантского магнитного сопротивления наноматериала), позволяющего эффективно производить магнитную запись требуемых данных большого объема на жесткие диски компьютеров с обеспечением атомарной плотности на них информации [2, 12].

### 3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МИРОВОГО РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Анализ текущего состояния бурно развивающейся во всем мире области нанотехнологий, выполненный на основе просмотренных автором литературных источников ограниченного количества [2-4, 7, 8, 12], тем не менее позволяет выделить в ней следующий ряд важнейших научно-технических направлений:

- **Материаловедение.** Создание "бездефектных" механически высокопрочных материалов, материалов с высокой электрической проводимостью и новых наноматериалов для нового поколения аккумуляторов и солнечных батарей с предельными энергетическими показателями. Создание супертонких металлических пленок, служащих основой для высококачественных магнитных материалов.
- **Молекулярный дизайн.** Манипулирование с отдельными атомами и молекулами, препарирование имеющихся молекул и синтез новых молекул с новыми свойствами в сильно неоднородных электромагнитных полях.
- **Приборостроение.** Создание усовершенствованных сканирующих туннельных микроскопов, атомно-силовых микроскопов, магнитных силовых микроскопов, многоострижных систем для молекулярного дизайна и миниатюрных сверхчувствительных нанодатчиков для регистрации различных физических и биологических характеристик.
- **Электроника.** Конструирование нанометрической элементной базы для вычислительной техники следующего поколения, наноантенн, нанопроводов и нанокабелей, нанотранзисторов, нановыпрямителей, дисплеев и акустических систем на основе новых наноматериалов.



- **Электродинамика.** Моделирование динамики атомов и молекул в предельно неоднородных электромагнитных полях, создаваемых многоострийными системами сканирующих зондовых микроскопов. Расчет электрических и магнитных свойств синтезируемых наноматериалов.

- **Оптика.** Создание нанолазеров и синтез многоострийных физических систем с нанолазерами. Изучение гибридных систем "зонд + нанолазер". Моделирование механизмов излучения, распространения и поглощения света в нанобъектах.

- **Робототехника.** Создание на основе применения нанотехнологических материалов нанороботов, обладающих функциями движения, обработки и передачи информации.

- **Механика.** Исследование механических напряжений и деформаций в наноматериалах и нанобъектах, анализ в них трения. Моделирование движений зонда сканирующего зондового микроскопа при целевом манипулировании нанобъектом. Моделирование движений в наномеханизмах для наноустройств и расчет наноманипуляторов. Разработка систем управления нанороботами.

- **Химический гетерогенный катализ.** Разработка химических катализаторов с наноструктурными конструкциями для разных классов химических реакций селективного катализа.

- **Медицина.** Проектирование наноинструментария для изучения и уничтожения вирусов, изучение взаимодействия искусственных наночастиц с природными биологическими объектами наноразмеров (белками и нуклеиновыми кислотами), исследование возможности локального "ремонта" биологических органов человека, изучение новых методов высокоточной доставки необходимых нанодоз лекарств в определенные места живого человеческого организма.

- **Фармакология.** Осуществление промышленного синтеза молекул разнообразных лекарственных средств и фармакологических препаратов четко определенной внутренней наноструктуры.

- **Метрология.** Создание компьютерных моделей систем "прибор – нанобъект" и их калибровка. Автоматизация нанометрических измерений и создание компьютерных банков метрологических данных для нанобъектов.

- **Трибология.** Определение связи наноструктуры материалов и сил трения и использование этих знаний при изготовлении перспективных пар трения для различных механических и электромеханических систем.

- **Теория самоорганизации.** Формулировка фундаментальных принципов самосборки наноконструкций. Создание компьютерных алгоритмов самосборки наноконструкций. Разработка вычислительных алгоритмов для качественного анализа моделей самосборки таких конструкций. Моделирование явлений пространственно-временной самоорганизации атомов и молекул вещества при создании наноматериалов.

- **Управляемые ядерные реакции.** Создание наноускорителей элементарных частиц и проведение в физике высоких энергий нестатистических управляемых ядерных реакций.

#### 4. УКРАИНА В МИРЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Сегодня стало общепринятым связывать будущее любой страны мира с тем, насколько она успешно продвигается в развитии и прикладном освоении современных нанотехнологий. Авторы работы [8], анализируя нынешнее состояние в области нанотехнологий, считают, что основным прорывным направлением практического использования материалов и приемов нанотехнологий в технике следует считать создание наноэлектронных приборов. В первую очередь это касается разработки на основе наноматериалов транзисторов и микросхем с многоплановой номенклатурой использования в вычислительной и микроволновой технике, метрологии, измерительной технике, аккумуляторах, солнечных батареях и фотоэкра-нах, а также в медицине в части инструментально контролируемого врачами-нанотехнологами вхождения человека с помощью наночастиц и наноустройств в структуру его биологических молекул и в молекулярное биостроительство его тканей и органов [8]. На какую же роль может рассчитывать Украина в мире нанотехнологий? Ответ на этот по сути шекспировский (гамлетовский) вопрос ("Быть или не быть?") кроется в современном состоянии соответствующих научных исследований и наноразработок в Украине. Здесь сразу требуется отметить, что украинские ученые существенно отстали за последние 20 лет от своих зарубежных коллег и их разработок в области нанотехнологий [8]. В нашей стране на сегодня согласно [7, 8] нет не то что технологической линейки создаваемых и выпускаемых наноматериалов, но даже хотя бы полного ряда современных инструментальных приборов высокого атомного разрешения, которые бы позволяли пусть даже на лабораторном уровне в полном объеме надежно манипулировать в пространстве микромира в области нанометра (об одном таком приборе – сканирующем зондовом микроскопе, установленном недавно в Институте металлофизики НАН Украины, было указано выше в подразделе 1). Тем не менее, следует отметить, что в отделе химии твердого тела Института общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского НАН Украины при изучении нанопроцессов в твердом теле были обнаружены новые редкие свойства неорганического наноматериала и разработаны на его основе новые керамические нагревательные элементы, не дающие электрической искры, которые в дальнейшем были использованы в промышленности [7, 8]. В Институте металлофизики НАН Украины не так давно был исследован новый физический эффект в многослойной структуре "ферромагнитный материал – пленка благородного металла толщиной в единицы нанометров – ферромагнитный материал" [8]. К этому следует добавить то, что в 2007 году самая престижная в научном мире Нобелевская премия по физике была присуждена зарубежному ученому за обнаружение эффекта гигантского магнитного сопротивления (GMR–эффекта, см. подраздел 2) именно в подобных слоистых магнитных средах, нашедших сейчас массовое применение в считывающих и записывающих магнитных головках жестких дисков компьютеров [2, 8]. Имеющийся пока в Украине интеллектуальный потенциал, а также несколько сохранившихся предприятий бывшего военно-промышленного комплекса при объединении своих усилий в рамках финансируемых государственных

программ по нанотехнологиям дают нам некий, хотя и весьма иллюзорный, но все же шанс на научно-технический прорыв на основе нанотехнологий в области микроволновой техники, солнечной электроники, метрологии и радиоастрономии [8]. Авторы краткого аналитического обзора по нанотехнологиям из [8] и автор данной статьи полагают, что необходимые интегрированные научно-производственные структуры для реализации в Украине отечественных и зарубежных наноразработок можно было бы создать на базе Института металлофизики НАН Украины, Института общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского НАН Украины, Института физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, Научно-парка "Киевская политехника", Киевских ОАО "НПП «Сатурн»" и государственного НИИ "Орион", Донецкого "Топаз", Днепропетровского машиностроительного завода, Запорожского радиозавода, ряда Харьковских (например, ННЦ "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины, Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" и Радиоастрономического института НАН Украины), Черновицких и Львовских институтов. На нашу "раскачку" в вопросе создания собственной национальной нанотехнологической базы у нас есть, по-видимому, не более 15 лет, по истечении которых уйдут в небытие пока еще существующие в Украине необходимые для решения этой комплексной научно-технической проблемы научные школы и инженерно-производственные коллективы, умеющие создавать и выпускать конкурентноспособную в мире продукцию.

## 5. НЕКОТОРЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

Международный опыт в области нанотехнологий показывает, что особую важность для нанотехнологических разработок имеют научные национальные нанотехнологические программы. На сегодня более 50-и развитых стран мира объявили о старте собственных нанотехнологических программ. В этом списке стран недавно появилась и Российская Федерация, но, к нашему большому сожалению, в нем по-прежнему нет Украины. Какие же проверенные практикой достижения уже можно уверенно отнести в актив нанотехнологий? Среди них следует назвать следующие технические изобретения и наноразработки [2, 12]:

- **Графен** – плоский монослой атомов углерода  ${}^6_{12}\text{C}$ , имеющий толщину порядка 0,1 нм [2-4]. Графен обладает высокой механической прочностью и подвижностью своих свободных электронов при комнатной температуре в 20 °С (см. подраздел 2). Благодаря последнему свойству, при окончательном решении научной проблемы формирования запрещенной зоны в этом полуметалле, графен как перспективный наноматериал может заменить хорошо послуживший в преобразовательной и электронной технике полупроводниковый материал кремний *Si* в выпрямителях, транзисторах и интегральных микросхемах. Недавно было установлено, что графен можно использовать и как детектор токсичных промышленных газообразных отходов – молекул двуокиси азота  $\text{NO}_2$  [12]. Оказалось, что он позволяет детектировать приход и уход с его поверхности даже единичных молекул  $\text{NO}_2$ .

- **Углеродные нанотрубки** – протяжённые ци-

линдрические углеродные наноструктуры (рис. 9), характеризующиеся в настоящее время диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной пока до нескольких миллиметров, и состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов) и обычно заканчивающиеся полусферической головкой (см. рис. 5) [2-4]. На поверхности углеродной нанотрубки атомы углерода  ${}^6_{12}\text{C}$  расположены в вершинах правильных шестиугольников (см. рис. 6).

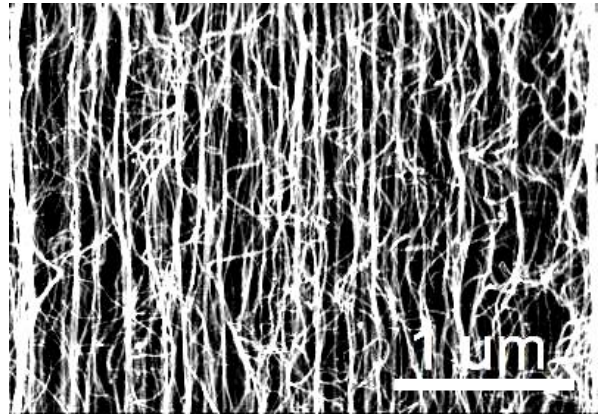


Рис. 9. Внешний вид углеродных нанотрубок при указанном на фотографии масштабе в 1 мкм [16]

Концы таких углеродных трубок закрыты с помощью правильных пятиугольников. Правильные шестиугольники являются ячейкой в плоском графитовом листе (графене), который можно свернуть в нанотрубки различной хиральности. Правильные пятиугольники (семиугольники) являются локальными дефектами в плоском графитовом листе, позволяющими получить его положительную или отрицательную кривизну. Комбинации правильных пяти-, шести- и семиугольников позволяют нанотехнологам получать разнообразные формы углеродных поверхностей в трехмерном пространстве. Геометрия этих наноконструкций, относящихся к наноматериалам 2-го рода, определяет их уникальные физические и химические свойства и соответственно возможность существования принципиально новых материалов на их основе и высоких технологий их промышленного производства. Для промышленного производства углеродных нанотрубок используются специальные химические катализаторы и дуговой электрический разряд в инертном газе [2]. Предсказание (возможный прогноз) физико-химических свойств новых углеродных наноматериалов на основе указанных нанотрубок учеными-химиками и физиками осуществляется как с помощью сложных квантовых расчетных моделей, так и приближенных оценок в рамках законов классической молекулярной термодинамики [6, 12].

- **Фуллерены** – шарообразные молекулярные соединения, принадлежащие к классу аллотропных форм углерода  ${}^6_{12}\text{C}$  и имеющие размеры порядка 1 нм (см. рис. 8) [2-4]. Некоторые фуллереновые наноматериалы обладают сверхвысокой механической прочностью, высокой упругостью и гибкостью. Поэтому их можно использовать в качестве присадки для улучшения свойств уже существующих макроматериалов. Существуют легированные фуллерены, обладающие свойствами очень хорошего электрического изолято-

ра, а есть фуллерены, являющиеся замечательными проводниками электрического тока. Оказалось, что путем ионного напыления одного вида легированного фуллерена можно получить нанопроводник, а путем напыления другого вида легированного фуллерена – наноизолятор или нанорезистор. В результате подобных действий можно получить простейшую электрическую схему, размеры которой будут исчисляться размерами ряда отдельных молекул. Такие электронные наносхемы будут гораздо миниатюрнее, проще в изготовлении и менее энергоемкими, чем существующие микросхемы. Сейчас созданы фуллереновые соединения (эндофуллерены), обладающие сегнетоэлектрическими свойствами, пьезоэффектом, диамагнетизмом, парамагнетизмом и даже сверхпроводимостью. В этой связи фуллерены и их соединения открывают путь к новой фуллереновой электронике и новым супермощным малогабаритным компьютерам, по объему памяти и быстродействию в тысячи раз превосходящими современные компьютеры. Замечательные возможности предоставляют гидрофуллерены (различные типы соединений фуллерена с водородом  $^1H$ ). Благодаря компактному и безопасному хранению водорода  $^1H$  в этих наноматериалах, становится возможным переход на нашей планете к эпохе солнечно-водородной энергетики. Гидрофуллерены дают возможность непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую и применения водорода в качестве экологически чистого топлива и энергоносителя. Большое будущее ожидает фуллерены и в качестве нового класса полупроводниковых материалов. Работы в этом направлении уже позволили создать сверхпроводящие (с критической температурой  $T_c$  в 52 К [2]) дырочно-легированные углеродные наноструктуры, напоминающие полевой транзистор. Особенно интересны водорастворимые производные фуллеренов, применение которых в биологии и медицине может привести, по образному выражению академика РАН Ю.А. Осипьяна, к "революционным последствиям" [2]. По мнению специалистов-нанотехнологов фирмы "Приморье" (г. Санкт-Петербург, Россия) к возможным техническим областям применения фуллеренов в настоящее время и в ближайшем будущем можно отнести [12]:

- Создание новых конструкционных материалов с уникальными свойствами для использования в строительстве инженерно-технических сооружений и при изготовлении средств индивидуальной защиты. Это касается тканевых материалов специального назначения (лент, волокон, полотен, парусов, канатов и сверхпрочных нитей) на основе модифицированных фуллеренами полимерных молекул, а также радиозащитных материалов на основе нитей из графита, модифицированных фуллеренами, и бетонополимеров повышенной прочности. Здесь можно указать и сверхпрочные (выше твердости алмаза) насадки и покрытия для специального металлообрабатывающего инструмента и скважинного инструмента бурильного оборудования в геологоразведке.

- Улучшение эксплуатационных характеристик транспортных средств и других специальных механизмов. Касается это следующих материалов: присадок к маслам и смазкам, резко повышающим износостойчивость пар трения в машинах и механизмах; антизадирных составов для узлов, работающих в

условиях повышенных механических и тепловых нагрузок; композитов тормозных колодок скоростных транспортных средств наземного и воздушного транспорта с повышенной теплоотдачей и износостойчивостью; износостойких материалов в условиях сухого трения; смазочно-охлаждающих технологических составов, увеличивающих срок службы машин и механизмов.

- Получение новых композиционных материалов электротехнического назначения. В том числе: композиционных материалов сильноточных устройств и скользящих сильноточных электрических контактов с повышенным ресурсом работы; материалов электродов химических источников тока; элементов сверхпроводящих конструкций на основе фуллереновых интеркаляторов.

- Получение новых композиционных материалов для оптики и радиоэлектроники. Сюда можно отнести: материалы защитных экранов компьютеров; материалы для технологии "стелс"; материалы разветвителей в волоконно-оптических сетях, а также для нелинейной оптики и модуляторов света.

- Создание материалов и микроэлектронных изделий специального назначения: высококачественных алмазоподобных пленок; материалов для микросенсоров; высокостойких тонкопленочных защитных покрытий; субмикронных резисторов.

- Разработку новых технологий в медицине, включающих получение: материалов эффективного диализа; материалов для защиты от проникающей радиации, в том числе солнечной; высокоэффективных сорбентов медицинского назначения.

- Разработку покрытий и новых защитных технологий, повышающих адгезию лаков, обеспечивающих увеличение влагозащитных эффектов и ресурса покрытий на истирание и приводящих к упрочнению и стабилизации полимерных лакокрасочных материалов.

- Создание новых источников энергии, в том числе литиевых аккумуляторов с повышенной электрической емкостью и улучшенными удельными весогабаритными характеристиками.

- Модификацию латексных эмульсий на основе синтетических каучуков, приводящую к производству шин повышенной проходимости и стойких водэмульсионных красок.

- Модификацию полиэтиленов, обеспечивающую производство полиэтиленов с повышенным сроком эксплуатации и хранения, а также полиэтиленов трубных марок с повышенной прочностью и эластичностью.

- Получение новых смазочно-охлаждающих материалов, приводящих к повышению эффективности смазочно-охлаждающих технологических составов в металлообработке и созданию эффективных добавок в масла металлообрабатывающих станков.

- Нефтехимию при создании высокоэффективных катализаторов технологических процессов крекинга и риформинга.

- **Нанокapsулы лекарств.** В Украине НПП "Вита" разработана оригинальная технология адресной доставки в организме больных сахарным диабетом инсулина с помощью нанокapsул (автор изобретения – Игорь Верба) [17]. Подобная технология доставки лекарственных препаратов на сегодня не имеет аналогов в мире. Разработанные в Украине медицинские

препараты инсулина имеют высокую температурную стабильность, значительно лучшее структурно-метаболическое действие и гликемический контроль. Принципиально новый и щадящий метод ввода препарата в организм больного (на основе наноканалов) позволил на порядок уменьшить токсическое действие препарата, что позволяет избежать множества существующих осложнений инсулиновой терапии.

• **Молекулярные шестерни и насосы.** Данные модели наноустройств были недавно предложены К.Е. Drexler и R. Merkle из IMM (Institute for Molecular Manufacturing, Palo Alto) [2]. "Корпусами" наношестеренок в коробке передач этих наноустройств являются плотно прилегающие друг к другу углеродные нанотрубки, а "зубцами" служат кольцевые молекулы бензола  $C_6H_6$  (см. раздел 1 данной статьи). Характерные частоты вращения шестеренок данных наноустройств (рис. 10) составляют несколько десятков гигагерц. Устройства "работают" либо в глубоком вакууме, либо в инертной среде при комнатной температуре в 20 °С. Для "охлаждения" подобных наноустройств обычно используются инертные газы.

• **Наноаккумуляторы.** О создании этого нового источника электроэнергии в начале 2005 года объявила компания "Altair Nanotechnologies" (США) [2]. Данный источник электроэнергии нового поколения базируется на оригинальном нанотехнологическом материале для электродов новых литий – ионных аккумуляторов. Такие аккумуляторы с электродами из химического соединения  $Li_4Ti_5O_{12}$  имеют время зарядки всего около 15 минут. В феврале 2006 года эта американская компания начала производство данных аккумуляторов на своём заводе в г. Индиана (США). В марте 2006 года фирма "Altairnano" и компания "Boshart Engineering" заключили соглашение о совместном создании электромобиля. В мае 2006 года успешно завершились испытания автомобильных наноаккумуляторов. В июле 2006 года указанная американская компания "Altair Nanotechnologies" получила первый реальный промышленный заказ на поставку литий – ионных аккумуляторов для электромобилей.

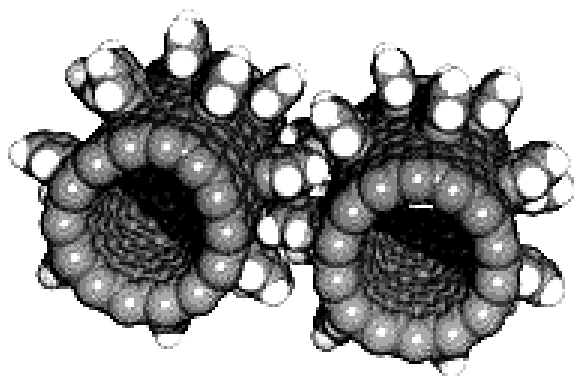


Рис. 10. Внешний вид модели совместно работающей пары молекулярных шестеренок, созданных на атомарно-молекулярном уровне методами нанотехнологии [2]

• **Нанопроцессоры.** Американская компания "Intel" 15 октября 2007 года заявила о разработке ею нового прототипа центрального процессора, содержащего наименьший структурный элемент размером примерно в 45 нм [2]. В последнее время в СМИ и

системе Интернет сообщалось, что в дальнейшем эта компания намерена достичь размеров структурных элементов нанопроцессора до 5 нм [12]. Отметим, что основной конкурент компьютерной компании "Intel" компания "AMD" также использует для производства своих процессоров нанотехнологические устройства, разработанные совместно с американской компанией "IBM". Характерным отличием их компьютерных наноустройств от наноразработок компании "Intel" является применение дополнительного изолирующего слоя SOI, препятствующего утечке электрического тока за счет дополнительной изоляции структур, формирующих транзистор. Уже существуют рабочие образцы нанопроцессоров этих мировых лидеров в создании компьютерной техники с транзисторами размером 32 нм и опытные образцы на 22 нм [2, 12].

• **Наноантенны.** В научно-исследовательской лаборатории Бостонского университета (США) 9 февраля 2005 года была создана антенна-осциллятор с габаритными размерами порядка 1 мкм [2]. Это радиотехническое устройство с наноустройствами насчитывает в себе около 5 миллиардов атомов проводящего электрический ток вещества и способно осциллировать с частотой 1,49 ГГц, что позволяет передавать с её помощью огромные объёмы полезной информации [2, 12].

• **Нанопипетты.** Японский ученый Наоки Коматсу (Shiga University of Medical Science) в 2007 году изобрел химический "нанопипетт", способный различать хиральные изомеры углеродных нанотрубок диаметром до 1 нм [18]. Известно, что углеродные нанотрубки по своей хиральности (термин "хиральность" происходит от греческого слова "cheir" – "рука" и обозначает вид объекта, который не тождественен своему зеркальному отражению [1]) разделяются на лево- и правоспиральные. Заметим, что с помощью современных методов синтеза в диссипативных системах при экстремальных условиях однослойных углеродных нанотрубок возможно приготовить лишь смесь, содержащую в равных пропорциях лево- и правоспиральные нанотрубки. Данная смесь нанотрубок одинаково сильно поглощает свет с правой и левой поляризациями. Для использования этих нанотрубок в оптоэлектронике необходимы только оптически активные нанотрубки, по-разному поглощающие свет с круговой поляризацией. Поэтому синтезированные углеродные трубки перед их использованием в оптоволокне должны быть разделены по своей хиральности. До важного изобретения Н. Коматсу в области нанотехнологий были известны способы сортировки углеродных нанотрубок лишь по их диаметру и длине [2, 12]. Разделение этих нанотрубок – стереоизомеров по своим различным хиральностям и соответственно по их различным оптическим свойствам являлось в мире рассматриваемых нами в этом разделе книги высоких технологий труднорешаемой научной задачей. В этой связи созданный японским ученым-нанотехнологом эффективный химический метод разделения стереоизомеров углеродных нанотрубок по различным хиральностям является важным шагом на пути к использованию оптически активных углеродных нанотрубок в таких передовых технических областях как нано- и оптоэлектроника, фотоника и квантовая оптика.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате краткого рассмотрения и определенного анализа новой и интенсивно развивающейся в передовых странах мира весьма перспективной научной области, занимающейся нанотехнологиями и прикладным применением их научно-технических достижений, можно сформулировать ряд выводов:

1. Нанотехнология как междисциплинарная дисциплина охватывает очень широкий круг научно-технических специальностей из различных областей человеческих знаний, начиная от квантовой физики, электронной микроскопии и заканчивая супрамолекулярной химией и молекулярной биологией. Для достижения успехов в этой высокой технологии, базирующейся на вероятностных закономерностях наномира, требуются национальные нанотехнологические программы и интегрированные научные центры, финансируемые как государственным бюджетом, так и заинтересованными крупными частными инвесторами, а также специалисты высшей квалификации широкого профиля и новейшее микроскопическое оборудование с высоким атомным разрешением.

2. Украинские ученые и инженеры на сегодня серьезно отстают от своих коллег из передовых стран мира в вопросах разработки и практического применения новых материалов и конструкций, основывающихся на технических возможностях нанотехнологий.

3. Имеющиеся на сегодня в мире научно-технические достижения в области нанотехнологий и их лабораторно обоснованные технические возможности позволяют надеяться нам на то, что синтезированные в промышленных условиях новые наноструктурные материалы и наноустройства с уникальными физическими и химическими свойствами приведут в ближайшее время к подлинным революционным преобразованиям в мировой технической сфере, включающей промышленность и быт трудящихся в ней людей, и в медико-биологической сфере нашего развивающегося общества.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
2. <http://www.fund-intent.ru/science/sinr003.shtml>.
3. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии / Пер. с англ. под ред. Ю.И. Головина. – М.: Техносфера, 2007. – 376 с.
4. Шулаев В.М. О природе неорганических наноматериалов // Оборудование и инструмент. – 2007. – № 6 (95). – С. 96-99.
5. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
6. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
7. <http://www.zn.ua/3000/3100/63683/>.
8. Якименко Ю., Нарытник Т., Цендровский В. Место Украины в мире нанотехнологий / Газета "Зеркало недели", № 29 (708) от 9-15 августа 2008 г.
9. Скляренко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Харьков: Веста, 2009. – 144 с.

10. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
11. Лернер М.И. Электровзрывные нанопорошки неорганических материалов: технология производства, характеристики, области применения. Автореферат дис ... докт. техн. наук (01.04.07). – Томск, 2007. – 31 с.
12. <http://nano.com.ua/content/view/56/32/>.
13. Шакирзянов Ф.Н. Графен и фоторезистивный эффект / Электричество. – 2011. – № 1. – С. 65-66.
14. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 1: Открытие периодического закона химических элементов // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 2. – С. 3-9.
15. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 11: Классическая механика // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 6. – С. 3-13.
16. <http://prostonauka.com/uglerodnye-nanotrubki-pozirovali-pered-kameroj>.
17. <http://www.ukrsmb.info/vita-1.html>.
18. <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2007/khimicheskii>.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bol'shoj illyustrirovannyj slovar' inostrannyh slov. - M.: Russkie slovari, 2004. - 957 s. 2. <http://www.fund-intent.ru/science/sinr003.shtml>. 3. Pul Ch., Ou`ens F. Nanotehnologii / Per. s angl. pod red. Yu.I. Golovina. – M.: Tehnosfera, 2007. – 376 s. 4. Shulaev V.M. O prirode neorganicheskikh nanomaterialov // Oborudovanie i instrument. – 2007. – № 6 (95). – S. 96-99. 5. Hramov Yu.A. Istoriya fiziki. – Kiev: Feniks, 2006. – 1176 s. 6. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Отв. ред. В.К. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 7. <http://www.zn.ua/3000/3100/63683/>. 8. Yakimenko Yu., Narytnik T., Cendrovskij V. Mesto Ukrainy v mire nanotehnologii / Gazeta "Zerkalo nedeli", № 29 (708) от 9-15 avgusta 2008 g. 9. Sklyarenko V.M., Syadro V.V. Otkrytiya i izobreteniya. – Har'kov: Vesta, 2009. – 144 s. 10. Knopfel' G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polya. – M.: Mir, 1972. – 391 s. 11. Lerner M.I. `Elektrovzryvnye nanoporoshki neorganicheskikh materialov: tehnologiya proizvodstva, harakteristiki, oblasti primeneniya. Avtoreferat dis ... dokt. tehn. nauk (01.04.07). – Tomsk, 2007. – 31 s. 12. <http://nano.com.ua/content/view/56/32/>. 13. Shakirzyanov F.N. Grafen i fotorezistivnyj `effekt / `Elektrichestvo. – 2011. – № 1. – S. 65-66. 14. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 1: Otkrytie periodicheskogo zakona himicheskikh `elementov // Elektrotehnika i elektromehaniка. – 2011. – № 2. – S. 3-9. 15. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 11: Klassicheskaya mehanika // Elektrotehnika i elektromehaniка. – 2012. – № 6. – S. 3-13. 16. <http://prostonauka.com/uglerodnye-nanotrubki-pozirovali-pered-kameroj>. 17. <http://www.ukrsmb.info/vita-1.html>. 18. <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2007/khimicheskii>.

Поступила 29.08.2011

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния"

Национального технического университета

"Харьковский политехнический институт".

61013, Харьков, ул. Шевченко, 47

тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I.

**An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 13: Nanotechnologies.**

A brief scientific and historical essay on the state-of-the-art research on nanotechnologies and accomplishments in this field implemented in various fields of science and technology.

**Key words – essay, nanotechnologies, accomplishments, implementations.**

## ТАЙНА ШАРОВОЙ МОЛНИИ

*Кулевидна блискавка – явище природи, що відбувається при ударі лінійної блискавки з її дією тепловою і магнітною енергією, що виникає навколо каналу лінійної блискавки і в результаті створюючої з навколишнього повітря хмару пари, перехідної під дією магнітного поля в сегнетоелектричний стан.*

*Шаровая молния – явление природы, происходящее при ударе линейной молнии с ее воздействием тепловой и магнитной энергией, возникающей вокруг канала линейной молнии и в результате образующей из окружающего воздуха облако пара, переходящего под действием магнитного поля в сегнетоэлектрическое состояние.*

Определение природы шаровой молнии – является целью раскрытия одного из уникального происхождения естественного явления природы. Выдающийся ученый физик Стаханов И.П., создатель гипотезы гидратации иона нейтральной молекулой воды, наиболее близко приблизившийся к раскрытию секрета природы шаровой молнии (ШМ) и оставивший глубокий след в истории науки о низкотемпературной плазме, является создателем кластерной ионно-молекулярной концепции.

### ГИПОТЕЗА КЛАСТЕРНОЙ ИОННО-МОЛЕКУЛЯРНОЙ ГИДРАТАЦИИ

Стаханов И.П., будучи уже известным ученым, профессором, много лет отдавший изучению особого, четвертого состояния вещества – плазмы, приступил до кропотливого труда по сбору и систематизации наблюдений очевидцев ШМ с тем, чтобы иметь возможность провести анализ, полученных статистически достоверных, сведений о свойствах исследуемого объекта и только на их основе сформулировал требования, которые необходимо предъявлять к гипотезам, претендующим на объяснение природы явления ШМ. Имея огромный научный опыт по определению свойств плазмы, Стаханов И.П. не стал искать общее единообразие между той, уже известной ему четвертой средой вещества – плазмой, состоящей из нейтральных частиц – ионов и атомов, в которых взаимодействие с внешними и собственными электрическими и магнитными полями играет определенную роль термоядерного синтеза, и той, еще никому неизвестной ШМ, которую все ищут, и не остановился на достигнутых им знаниях, не поддавался соблазну и не стал подгонять, и приспособлять уже известное ему понятие плазмы под ШМ, как это делают некоторые исследователи, чем он очень удивил их [1]. Будучи настоящим ученым, Стаханов И.П. начал исследование явления ШМ с самого начала, с наблюдений над природным явлением. Он систематизировал, полученные от очевидцев, результаты наблюдений за ШМ, и только после этого приступил к изучению истории исследований явления ШМ. Стаханов И.П. провел сравнительный анализ основных существующих гипотез и изложил по этому поводу свои соображения в очень интересной с научной точки зрения книге под названием "О физической природе шаровой молнии", где подробнейшим образом обрисовал свою концепцию кластерной ионно-молекулярной гипотезы естественного происхождения, на основе которой ионы

$\text{OH}^-$  и  $\text{H}_2\text{O}^+$  быстро гидратируют, покрываясь оболочками нейтральных молекул воды, которые прочно связываются с ионами, образуя ионизованные кластеры пара воды, и предстают в виде разнозаряженных ионов модели  $\text{OH}^- (\text{H}_2\text{O})_n$  и  $\text{H}_2\text{O}^+ (\text{H}_2\text{O})_n$ . В своей книге Стаханов И.П. подробным образом описал все возможные ряды ионно-молекулярных реакций и, на основе подтвержденных экспериментальными исследованиями, им были определены расчеты энергии гидратации ионов, а также константы равновесия и скорости реакции гидратации при различных температурах. Надо сказать, проведена работа огромного масштаба и даже высказан ряд сомнений, в которых ученый был прав. Стаханов И.П. не стал настаивать на образовании только своих ионно-гидратированных кластерных моделях, а сообщил, что в настоящее время также существуют многие другие кластеры, ионы которых состоят из таких оболочек молекул, как " $\text{O}_2^+ (\text{O}_2)_n$ ,  $\text{NO}^+ \text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_4^+ (\text{NH}_3)_3$ " и других [Puskett and Teaque, 1971, Niles et al., 1972]". При этом гидратироваться могут все известные ионы  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{O}_2^+$  и др. [2, с. 197, 199, 1 абз.]. Хочется заверить, что настоящее прочтение ценного научного труда Стаханова И.П. не имеет цель пересказа его содержания, а основа книги предлагается, как предмет рассмотрения самой концепции кластерной ионно-молекулярной гипотезы, в свете научного определения, имеющейся при этом возможности, на основе общих физических законов, провести сопоставление ее сути с новой кластерной дипольно-молекулярной гипотезой.

Так, с точки зрения обеих кластерных гипотез, ШМ представляет собой уникальный, с одной стороны ионно-химический реактор, и, с другой стороны, дипольно-молекулярный и тоже реактор, оба которых работают при относительно низких температурах. "Именно на основе этого реактора и состоит наиболее интересное практическое применение кластерных плазм, хотя возможность накопления значительной энергии в сравнительно небольшом их объеме и при совершенно ничтожной массе также не стоит сбрасывать со счетов" [2, с. 202]. Конечно, гипотеза ионно-химической плазмы, которая, без всякого сомнения, и соперничества может параллельно сосуществовать с кластерной дипольно-молекулярной гипотезой, и она имеет на это право, ибо обе гипотезы имеют много общего, так как обе образуются на кластерной водопаровой низкотемпературной основе. Единственное различие состоит в том, что кластерная ионно-

химическая гипотеза не представляет, по заявлению самого автора гипотезы, стройную единообразную систему. Именно нет четкого определения по кластерным ионам: "Все, что мы знаем о кластерных ионах, получено в экспериментах над системами с очень низкой плотностью ионов, которые вследствие этого должны рассматриваться либо как заряженные газы, либо как идеальная плазма или как неидеальная плазма. ...или в чем-то еще" [2, с. 197, 199, 1 абз.]. Надо отдать должное Стаханову И.П., он сделал все, чтобы убедить академический научный мир в правомочности существования плазмы на основе гидратации ионов молекулами воды. Но отсутствие единообразной системы, закономерности процесса образования гидратации ионов, вынуждает его к высказыванию: "К сожалению, структура гидратированных ионов пока еще не установлена. Даже для кластеров с небольшим  $n$  предлагаются различные структурные формулы" [2, с. 193]. Способ рассмотрения Стахановым И.П. свойств ШМ на основе кластерной ионно-молекулярной гипотезы строился исключительно на теоретических предположениях, которые подкреплялись основательными расчетами и ссылками на проведенные измерения сечений рекомбинации гидратированных ионов известными исследователями [2, с. 192, абз. 2]. Однако главное не в сделанных ученым предположениях, а в том, что свои объяснения он построил, ограничившись частными примерами взаимодействия двух разнозаряженных гидратных ионов, что не позволяет увидеть общего процесса, происходящего в общей структуре, плазмы. Несмотря на отсутствие, по заявлению ученого, структуры гидратированных ионов, он был близок к утверждению системы цепочной структуры построения кластеров. Попробуем воссоздать структурную схему соединений группы кластеров, на основе которых Стаханов И.П. первоначально объяснял создание, из большого количества с дипольными моментами молекул воды ионов, больших и устойчивых сольватных молекул, под названием кластеры, которые он представлял себе, как группу ионов в более сложном виде молекулы - додекаэдра. Итак, из теории электротехники известно, что молекула воды, являясь молекулой вещества, с основой диэлектрика второго класса, способна проявлять свойство поляризации, то есть под воздействием внешнего электрического поля, в данном случае под электрической напряженностью иона, с которым молекула воды вступила во взаимодействие, образовав с ним кластер, и сама поляризовалась, а именно, повернула свой дипольный момент в соответствии со знаком своего иона. Поскольку кластер гидратированного иона находится в объеме плазмы ШМ, то ему приходится взаимодействовать на основе гетерополярной связи с другими кластерами, имеющими ионы противоположных знаков, и соединяться в групповую структуру предположительно цепочного соединения, где в соединении участвуют напряженности полей дипольных моментов молекул воды каждого кластера, имеющего ориентацию знака напряженности поля противоположному знаку напряженности дипольного момента молекулы воды другого кластера, с которым приходится соединяться. Но при этом, в соответствии

с физическим законом, гидратированный ион, покрытый нейтральной молекулой воды, на деле становится защищенным от воздействия со стороны другого иона с противоположным знаком заряда. К тому же известно, что в пределах каждой молекулы воды гидратированного иона, возникают лишь смещения положительного заряда вдоль направления электрического поля и отрицательного заряда в обратном направлении диэлектрика, каким являются молекулы воды. Являясь нейтральными молекулами воды и образуя между собой из напряженности дипольных моментов цепочные соединения, молекулы воды осуществляют только валентную молекулярную связь между точечными разно заряженными ионами, а поскольку заряды поляризованных молекул воды, в отличие от зарядов проводников, отделиться от молекул не могут, то, стало быть, осуществить электрическую проводимость между кластерными, не одинаково заряженными точечными ионами, не могут. Следовательно, гидратированные ионы разных знаков, будучи в структуре облака ШМ, не находятся в постоянном контакте друг с другом, и пребывая в хаотическом движении внутри облака, только соударяются, и потому, в совокупности плазмы "должны рассматриваться либо как заряженные газы, либо как идеальная плазма и различие между этими средами определяется соотношением характера размера среды  $R$  и радиуса Дебая" [2, с. 197, 199, 1 абз.]. Появлению таких систем, состоящих из кластерных ионов в газовой фазе, способствует то, что, в отличие от растворов, ионы разных знаков не находятся в постоянном контакте друг с другом и при неупругих соударениях создается образование нейтральных кластеров, в которых противоположно заряженные ионы разделены нейтральными оболочками воды. Таким образом, "газ состоящий из гидратированных ионов, покрытых нейтральными молекулами воды, не может быть проводником, и все описанные в разделе 2.6 главы 4 явления оказываются необъяснимыми" [2, с. 182, абз. 3], ибо выделение энергии в виде электростатического напряжения возможно только при условии выполнения закона Кулона, когда в плазменной среде частицы, взаимодействуя между собой, осуществляют проводимость электронов (в случае главы 4 возможно лишь на основе разрушения, большой разностью потенциала, электрической прочности молекул воды), что создает электрический ток и возникновение напряженности электромагнитного поля, векторная величина которой по закону напряженности поля, должна иметь возможность отображаться в алгебраической теории сложения векторных величин напряженности дипольных моментов кластеров плазмы, чего, однако, ни в первом, ни во втором случае гипотезы, кластерной ионной гидратации молекулами воды, выполнения не предусмотрено. Следовательно, между нейтральными молекулами воды, гидратирующих ионов, которые не только покрывают ионы, но и изолируют точечные ионы друг от друга, и на деле проводимость в плазме отсутствует, а также отсутствуют и цепочные структурные модели ионов кластерных соединений.

Допустим, что Стаханов И.П. в своем предположении, о возможном пространственно структурном по-

строении плазмы из гидратированных ионов на основе цепочного соединения кластеров, прав и цепочные соединения состоят только из гидратов оксониевых и цепочных структур моделей ионных кластеров, и формулы ионов, естественно, должны писаться в виде  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_7$  и  $\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_7$ . При этом точечный заряд каждого иона должен будет осуществлять потенциальную энергию связи через посредство цепочной напряженности дипольных моментов молекул воды с 14-тью, а не с 7-ю, как ошибочно предполагает И.П. Стаханов [2, с. 191, абз. 2], гидратированными ионами противоположного знака, то есть будет осуществлять рассредоточенное действие энергии напряженности электростатической индукции гидратированного иона в 14-ти объемно круговых направлениях. Но тогда кинетическая энергия разрушения связи, реакции рекомбинации, должна будет распределяться из расчета только одного направления, существующего между двумя гидратированными ионами, что в числовом выражении получается в 14 раз меньше величины потенциальной энергии связи дипольными моментами 14-ти молекул воды, гидратирующих и электрически защищающих ион. Безусловно, при таком соотношении величин энергетических полей, преодолеть, пробить диэлектрическую проницаемость молекулы воды разностью потенциала точечного заряда гидратированного иона в 14 раз меньшей величины электрической прочности молекулы воды, не представляется возможным. Вероятно, в связи с неопределенностью расчетных выкладок и возникает у Стаханова И.П. вопрос, а "может ли кластерная оболочка помешать рекомбинации ионов в газовой среде?" И сам же ученый дает ответ, на поставленный вопрос: "Нам представляется это бесспорным, когда энергия гидратации превосходит энергию, выделяющуюся при их рекомбинации" [2, с. 190, абз.3]. Затем: "Итак, в газовой фазе, казалось бы, могут возникнуть условия, когда рекомбинация ионов энергетически невыгодна, как это случается в растворах электролитов. Однако суть гипотезы, которую мы сейчас обсуждаем, состоит не в этом. В рассматриваемом выше случае система гидратированных ионов оказывается энергетически устойчивой: она не может служить источником энергии. Нас интересуют условия, когда рекомбинация, несмотря на то, что она все еще происходит с выделением энергии, заторможена, т.е. случаи метастабильного, неравновесного состояния системы. К сожалению, экспериментального подтверждения этого факта пока отсутствуют" [2, с. 181, абз.3].

Продолжая обсуждение, допущенных предположений, о возможности структурных построений гидратированными ионами на основе оксониевой модели более сложных кластеров, при этом необходимо признать, что в настоящее время обнаруживаются устойчивые структуры, так называемые клатраты  $(\text{H}_2\text{O}^+)_{21}$ , состоящие из 21 молекулы воды и протона [Holland and Castelman, 1980] [2, с. 195]. Однако любое предположение или ссылка на экспериментальные данные должны обосновываться указанием причины, которая способствует возникновению структуры построения гидратированных ионов, в каком бы то ни было виде, либо оксониевой  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{H}_9\text{O}_4^+$  модели, либо в какой другой структуре построения модели, к примеру, в кольцевой  $\text{H}_5\text{O}_2^+$  или протоноцентрированной  $\text{H}_7\text{O}_3^+$  и  $\text{H}_9\text{O}_4^+$ .

При отсутствии объяснения причины, приходится недоумевать, почему в таком замечательном, с научной точки зрения, фундаментальном труде нет самого главного, основополагающего признака, нет мысли о закономерности, обуславливающей образование гидратации иона на основе какого-либо физического закона, причины или условия, которые могут управлять процессом структурного построения гидратированных ионов. Если бы структурное построение модели гидратированных ионов находилось под управлением какого-либо физического закона, то результат структурного построения модели иона, естественно, был бы прогнозируемым, и Стаханов И.П. не стал бы отвлекаться на рассмотрение ненужных структур моделей кластеров, энергетические характеристики которых несколько уступают оксониевым моделям. Да и пространственное объемное построение плазмы было бы значительно упрощено. Возможно, задумка гипотезы кластерной ионной гидратации частиц сложилась при ознакомлении Стахановым И.П. с исходными материалами исследований, проведенными по изучению химии D-слоя ионосферы и верхних слоев земной атмосферы, в результате которых было обнаружено большое количество образований гидратных оболочек ионов и поскольку считается, что исследования обладают большой достоверностью, то они как бы уже и не потребовали дополнительной проверки и доказательств? Идея кластерной ионной гидратации частиц пара на основе ионизованного облака канала разряда линейной молнии казалась уж очень заманчивой, до абсурда настолько простой, что напрашивалась сама собой: а так как атмосфера земли располагает большим количеством гидратированных ионов, то почему бы эти гидратированные ионы не сгруппировать и так создать плазму? Теперь понятно почему, на основе разряда линейной молнии с процессом образования канала разряда, акцентом рассмотрения послужило, именно возникающее вокруг канала разряда, ионизованное облако диаметром 1м, которое по предположению Стаханова И.П. и способствует ионизации разнозаряженных частиц, а затем в течение 0,2 секунды осуществляет гидратацию ионов нейтральными молекулами паров воды, хотя процесс как-то объясняется обыденно мало, нет завершённой закономерности. Но, вероятно, на тот момент все казалось естественным, как это существует в самой природе, а на деле привело автора к ошибке, выбранного им направления гипотезы ионной гидратации. Ошибка ли это? Допустим, что нет. Стаханов И.П. был первым у истоков по созданию ШМ естественного происхождения и своим трудом дал полное обоснованное представление о свойстве ШМ, как о низкотемпературном плазменном реакторе, чего до него никто сделать не смог. Именно он дал научное пояснение существующей разнице между фазой газа, идеальной и неидеальной плазмой. И четко, как обрезаю, предостерегающе заявил многочисленным искателям шаровых молний, доказывающих свое право первооткрывателя модели ШМ: "Оболочки с очень сложной и развитой структурой могут существовать только при низкой температуре и высокой плотности, и это может быть причиной того, что это вещество не удается получить в обычном газовом разряде" [2, с. 199].



## ГИПОТЕЗА КЛАСТЕРНОЙ ДИПОЛЬНО-МОЛЕКУЛЯРНОЙ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Задача, которая поставлена, решается тем способом, что в поисках построения модели ШМ должно быть принято качественно новое определение и оно заключается в том, что ШМ – это естественное природное образование единое с родни образованию грозового облака, которое в соответствии с определением академика В.И. Вернадского имеет свои особенные границы аномального атмосферного явления с единым законом происхождения, и существует в своей среде, неразрывно с ней связанной, сохраняясь за счет динамического равновесия внешних и внутренних процессов, и является логически замкнутой природной системой, коррелирующей с общими свойствами механизма возникновения и существования ШМ. Системой с энергией возбужденных атомов и молекул вещества, существующего также за счет энергии, высвобождаемой при рекомбинации кластеров системы плазменной модели. Способ создания модели ШМ, основан на физическом законе энергетического действия на водяной пар магнитным полем Земного процесса, превращающий воду с обычным физическим свойством в воду с физическим сегнетоэлектрическим свойством. Как уже было отмечено выше наиболее вероятным местом возникновения ШМ является пространство возле канала разряда линейной молнии. Как всякий проводник, канал разряда, находящийся под высоким энергетическим потенциалом разряда линейной молнии, окружен не только ионизованным коронным облаком, но и широкой областью не менее 1 метра в диаметре магнитным полем, которым во время разряда линейной молнии производится энергетическое действие на водяной пар, образованного температурой источника разрядом линейной молнии. Вблизи земли найти воду не составляет большого труда. Она может содержаться в больших количествах в воздухе, в виде гидратированных ионов и на поверхности земли, на листьях и на других предметах в виде росы. За время разряда молнии, за время 0,2 секунды, вода испаряется и заполняет значительный пространственный объем, где вода распределена в виде частиц пара [2]. Температура пространства возле канала разряда, где возникает облако пара ШМ, во много раз ниже температуры канала разряда молнии и едва ли превышает, особенно в периферических частях пространства, несколько сотен градусов. В течение 0,1-0,2 секунды облако пара быстро остывает и при остывании состояние пара, находящегося под воздействием магнитного поля канала разряда линейной молнии, который также, как и снижение температуры пара, снижает интенсивность напряжения магнитного поля, что приводит к стечению условия, когда температура парового облака и напряженность магнитного поля достигают условий закона Кюри, экспериментально установленной константы Кюри, при которой соотношение напряженности магнитного поля и температуры пара величиной +10 °С становится равной:

$$H^2/(T + \Delta T_c) = -0,79 [3], \quad (1)$$

что есть константа намагниченности воды.

На рис. 1 графически представлен процесс намагничивания парового облака, происходящий в соответствии с условием закона Кюри, где  $H$  – напряженность магнитного поля в А/м,  $T$  – абсолютная температура,  $T_c$  – температурная точка Кюри,  $E(I, U, V)$  – электрическая напряженность канала разряда линейной молнии.

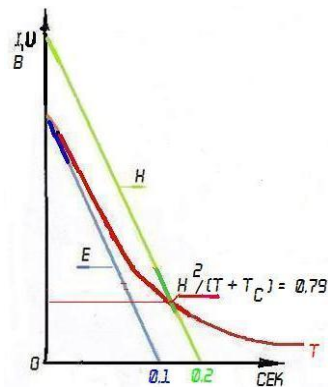


Рис. 1

Так, хаотически направленного расположения дипольных моментов, в результате изменения (скачком) фазовой прочности структуры построения пара все, до этого действующие, кулоновские и ван-дер-ваальсовы водородные связи исчезают и дипольные моменты молекул поворачивают свои оси, ориентируя их вдоль и против направления действия силовых линий энергетических полей и неустойчивое состояние анизотропии, в процессе разупорядочения дипольных моментов пара, сменяется на состояние, когда все молекулы водорода и кислорода обретают полную свободу перемещения. Энтропия распада структуры сопровождается выделением энергии, которая тут же потребляется на процесс упорядочения, чтобы все дипольные моменты, высвободившихся от гетерополярных водородных связей молекул, перемещая их, в зависимости от температуры пара облака, со скоростью от  $10^{-3}$  до  $10^{-8}$  [2, с. 202] в секунду, изменили структуру [2, с. 190-194, 208] внутреннего построения кристаллических решеток модели ионов  $(H_2O)_n$  воды с хаотической дипольной направленностью молекул и выстроили их в цепочный вид  $H_5O_2^+$ ,  $H_7O_3^+$  и  $H_9O_4^+$  моделей ионов. Под действием магнитного поля извне все дипольные моменты кластеров обретают ориентацию направленности вдоль стороны действия силовых линий напряженности магнитного поля, и при этом диполи перестраиваются в последовательно параллельные соединения кластеров цепочной модели вида  $H_7O_3^+$  и  $H_9O_4^+$ , где на основе гетерополярной связи происходит присоединение положительного знака потенциала напряженности диполя нижнего кластера к отрицательному знаку потенциала напряженности верхнего диполя, рядом стоящего, кластера (также, как это соответствует соединению химических элементов в батарею), что составит сумму напряженности дипольных моментов кластеров в цепочном соединении

$$E_{\Sigma} = E_1 + E_2 + \dots + E_n, \quad (2)$$

где суммарная составляющая, являясь напряженно-

стью электрического поля, также находит отражение в алгебраической теории сложения коллинеарных векторных величин напряженности дипольных моментов кластеров парового облака, и где "n" определяет количество кластеров в последовательном цепочном соединении, длина которого равна средней высоте парового облака, а сами вертикальные последовательно построенные цепочные соединения кластеров, путем водородной связи, соединяются в параллельные соединения электрических цепей парового облака и уже представляют собой большое плазменное облако соединения, что является процессом перехода воды с обычным физическим свойством, свойством диэлектрика второго класса, в воду с физическим сегнетоэлектрическим свойством, когда образуется условие соответствия закона Кулона [2, с. 216] и в паровом облаке возникает электропроводимость. При этом на поверхностях облака создается разность потенциала в виде электростатического напряжения высокого потенциала, равного суммарной величине напряженности каждого дипольного момента всех кластеров парового облака, соединенных в последовательные цепочки с суммарной результирующей

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta E_i \quad (3)$$

и емкостью заряда

$$Q = 2n \cdot \sum_{i=1}^k f(p_i) \Delta N_i m, \quad (4)$$

где  $n$  – число диполей кластеров в площади поперечного сечения облака,  $p$  – электрический момент единицы объема и  $m = ql$  – электрический дипольный момент, что в выражении ЭДС электростатического напряжения для плазмоида размером 20 см в диаметре составит более 30 кВ [2, с. 201, абз.2].

Поскольку, в соответствии с физическим законом, вещество ШМ обладает поверхностным натяжением, то, при переходе воды в состояние сегнетоэлектрического облака, оно имеет тенденцию подобно растянутой упругой пленке собираться в одном месте и обеспечивает превращение, из первоначального 0,5 м<sup>3</sup> объема парового облака с обычным свойством воды, в сферическое плазменное, энергетическое облако размером 20 см в диаметре [2, с. 206-207]. При появлении на поверхностях сегнетоэлектрического облака ЭДС с высоким электростатическим потенциалом, плазмодид начинает взаимодействовать с окружающими его ионами воздуха, что проявляется эффектом светящего вокруг плазмоида электрического коронирования, которое означает возникновение электрического тока и, естественно, возникновение своего собственного у плазмоида магнитного поля, которое удерживает плазмодид от испарения и это позволяет получить холодную (с температурой окружающей среды), из парообразной плазмы, энергетически светящуюся и обособленную от внешнего энергетического источника, ШМ естественного происхождения.

**Вывод.** Так как принцип создания и длительное существование модели ШМ, несмотря на всю необычность этого факта, он основан на научно обоснованном фундаментальном законе физики, известном в настоящее время [3], и который не противоречит способу его производства и представляет собой уникальный кластерный дипольно-молекулярный плазменный реактор, работающий при относительно низких температурах, и который можно искусственно моделировать, производя его в лабораторных условиях (Патент на корисну модель № 68032 від 12.03.2012 – Спосіб одержання кульової блискавки). Как надеются Германские физики из Института физики плазмы им. Макса Планка и Берлинского университета им. Гумбольдта, что искусственные объекты, называемые шаровыми молниями или плазмоидами, в перспективе позволят разработать генераторы плазмы, необходимой для поддержания реакции термоядерного синтеза. В своих попытках приручить шаровую молнию ученые Петербургского института ядерной физики РАН, по их же заявлению, также получают возможность приблизиться к познанию явлений, связанных с существованием НЛЮ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ратис Ю.Л. Естествознание. Экономика. Управление. Сб. науч. трудов. Спец. выпуск. Самара, СГАУ. – 2003.
2. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Новый мир, 1996.
3. Пьер Кюри. Избранные труды. Магнитное свойство тел. Изд. Наука, 1966.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ratis Yu.L. Estestvoznanie. `Ekonomika. Upravlenie. Sb. nauch. trudov. Spec. vypusk. Samara, SGAU. - 2003. 2. Stahanov I.P. O fizicheskoy prirode sharovoy molnii. M.: Novyj mir, 1996. 3. Per Kyuri. Izbrannye trudy. Magnitnoe svojstvo tel. Izd. Nauka, 1966.

Поступила 25.11.2012

*Савич Эдуард Владимирович,*  
пенсионер, до 1994 г. – заведующий отделом ЦЭБОТнефтегаз НИПИАСУтрансгаз  
61004, Харьков, ул. Маршала Конева, 16.  
тел. (057) 62-92-75

*Savich E.V.*

#### **Secret of a ball lightning.**

A ball lightning is a natural phenomenon that occurs at a streak lightning stroke with its action by thermal and magnetic energy releasing around the streak lightning channel and transforming, in the end, the surrounding air into a steam cloud that transits into ferroelectric state under the magnetic field action.

**Key words – ball lightning, streak lightning stroke, magnetic field action, steam cloud transition, ferroelectric state.**

## ЧЕТВЕРТОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДЫ

*Четвертый стан воды – це водяна пара під енергетичною дією напруженості магнітного поля в точці Кюри, у момент магнітного фазового переходу знаходить властивість сегнетоелектричної плазми, яка є основою утворень таких природних явищ, як грозова хмара і кулевидна блискавка, здатних за певних умов виділяти блискавкові розряди і при вибуху велику кількість теплової енергії, що характерний для низькотемпературного реактора.*

*Четвертое состояние воды – это водяной пар под энергетическим воздействием напряженности магнитного поля в точке Кюри, в момент магнитного фазового перехода обретает свойство сегнетоэлектрической плазмы, которая есть основа образований таких природных явлений, как грозовое облако и шаровая молния, способных при определенных условиях выделять молниенные разряды и при взрыве большое количество тепловой энергии, что характерно для низкотемпературного реактора.*

Цель статьи заключается в обоснованном определении понятия: четвертое агрегатное состояние воды. В настоящее время известны только три агрегатных состояний – это вода в жидком виде, в виде льда и пара. Если кому-то неизвестно, то дистиллированная вода по классическому определению – это полярный диэлектрик со свойством диэлектрика второго класса, у которого при отсутствии воздействия внешнего электрического поля все дипольные моменты в пространстве сориентированы хаотически, и вследствие этого результирующее поле вокруг полярного диэлектрика равно нулю. Под действием же внешнего электромагнитного поля молекулы воды, а стало быть, и ее дипольные моменты, поворачиваются на встречу действия электромагнитного поля и оси дипольных моментов ориентируются против внешнего поля. С устранением внешнего электромагнитного поля поляризация диэлектрика, т.е. воды, исчезает. Таким образом, поляризация воды представляет собой, как бы упругое смещение электрических зарядов в веществе диэлектрика, т.е. внешнее электромагнитное поле преодолевает сопротивление, существующих сил (сил ван-дер-ваальсового притяжения) водородных связей воды, удерживающих равновесное физико-химическое состояние. При некоторой определенной величине напряженности электромагнитного поля смещение зарядов, а вернее, изменение угла поворота осей диполей молекул воды, достигает предельной, критической величины, после чего происходит разрушение гетеро-полярных связей и наступает пробой диэлектрика, в результате которого диэлектрик теряет свои изолирующие и магнитные свойства и становится токопроводящим веществом [1]. Для воды пробой означает изменение химико-физических свойств внутренней структуры построения кристаллических решеток воды, результатом изменения которых происходит химическая реакция с выделением водорода  $H^+$ , группы гидроксильных оснований  $OH^-$  и электрона  $e^-$ . Электрический пробой воды и, связанный с этим явлением, появление в воде гидратированного электрона, вызывающего у воды появление голубоватого оттенка, у многих исследователей ассоциируется с переходом воды в сегнетоэлектрическое состояние, что является ошибкой. По структуре хаотического дипольно-молекулярного внутреннего построения воды, с ее межмолекулярными гетерополярными свя-

зьями сил притяжения и отталкивания, где расстояния между молекулами жидкой воды мало и, чтобы преодолеть силы притяжения, с целью повернуть все диполи молекул в одну сторону и против направления энергетического действия электромагнитного поля, у жидкой воды нет такой возможности и при определенной величине электромагнитного поля силы притяжения разрушаются, и наступает электрический пробой. Возникает вопрос, а можно ли создать устойчивое (упорядоченное) намагничивание жидкой воды и что же такое пар воды? Известно, пар – это состояние воды в виде газа, состоящего из частиц пара, где отсутствуют сильные кулоновские и ван-дер-ваальсовы взаимодействия между дипольными моментами. Частица же пара это величина, определяющая в своем составе одну или небольшую группу кристаллических решеток воды, расстояние между молекулами которых оказывается увеличенным и, на основании физического закона, величина сил сопротивления (притяжения) гетерополярных связей уменьшается пропорционально квадрату расстояния между молекулами пара и стабильно существуют в диапазоне температуры внутримолекулярного давления, в соответствии с этим испытывают магнитные фазовые переходы, что приводит к условию, когда, при определенном соотношении величин температуры пара и энергетического внешнего действия электромагнитного поля, пар намагничивается, при этом ослабленные гетерополярные связи пара исчезают и молекулы, а также в целом и частицы пара, обретают полную свободу (разупорядочение) перемещения и на основании закона физики, свободно перемещающиеся и находящиеся под действием внешнего электромагнитного поля, молекулы и частицы пара прекращают свое хаотическое перемещение и стабильно устанавливаются ориентацией полярными осями своих дипольных моментов вдоль направления действия силовых линий электромагнитного поля. Именно такое определенное соотношение величин напряженности магнитного поля и температуры, при котором происходит намагничивание диамагнитных веществ, в том числе и воды, некогда экспериментально определил П. Кюри, и тем самым, установил закон намагничивания веществ, проходящих при нагревании или охлаждении через точку Кюри. Однако следует заметить,

что во время эксперимента, П. Кюри проводил определение коэффициента намагничивания, и в частности воды, используя исключительно только воду, а не пар. Испытуемая в эксперименте вода находилась в запаянной ампуле, т.е. в замкнутом, наполненном водой объеме, а так как вода, в отличие от других веществ, при нагревании не расширяется, но, стесняемая своим внутренним давлением, вода не могла переходить в состояние пара, и П. Кюри, в эксперименте по определению коэффициента намагниченности вещества, не устанавливал факт магнитного фазового перехода воды в физическое свойство сегнетоэлектрика [2], а остановился лишь на факте свойства намагниченности вещества.

Однако, при определении коэффициента намагниченности вещества, когда максимум намагниченности вещества находится на границе магнитного перехода, в точке Кюри, наука впоследствии стала считать, определяющим фактором магнитного фазового перехода вещества, переход из одного физико-химического состояния в другое.

### ОСОБЕННОСТИ ЗАКОНА КЮРИ

Совсем по другому обстоит дело с кучевым паровым облаком свободно парящим в атмосфере, которое снизу подогревается восходящими теплыми потоками, а сверху обогревается солнцем. Разогретое паровое облако, будучи под действием энергетической напряженности силовых полей: атмосферного электрического поля и напряженности земного магнетизма; на основании магнитного фазового перехода при определенных условиях соответствия закона Кюри [2], когда выполняется соотношение

$$H^2/(T+\Delta t) = -0,79, \quad (1)$$

действующих на паровое облако величин напряженности магнитного поля  $H$  и температуры облака  $t = +5^\circ\text{C}$ , (где  $H$  – в единицах измерений А/м, и  $T$  – абсолютная температура в К), что соответствует значению  $const$  намагничивания воды. Так, хаотически направленного расположения дипольных моментов, в результате изменения (скачком) фазовой прочности структуры построения пара все, до этого действующие, кулоновские и ван-дер-вальсовы водородные связи исчезают и дипольные моменты молекул поворачивают свои оси, ориентируя их вдоль, но против направления действия силовых линий энергетических полей и неустойчивое состояние анизотропии, в процессе разупорядочения дипольных моментов пара, сменяется на состояние, когда все молекулы водорода и кислорода обретают полную свободу перемещения. Энтропия распада структуры сопровождается выделением энергии, которая тут же потребляется на процесс упорядочения, чтобы все дипольные моменты, высвободившихся от гетерополярных водородных связей молекул, перемещая их, в зависимости от температуры пара облака, со скоростью от  $10^{-3}$  до  $10^{-8}$  [3, с. 196] в секунду, изменили структуру [3, с. 190-194] внутреннего построения кристаллических решеток модели ионов  $(\text{H}_2\text{O})_n$  воды и выстроили их в цепочный вид  $\text{H}_3\text{O}_2^+$ ,  $\text{H}_7\text{O}_3^+$  и  $\text{H}_9\text{O}_4^+$  моделей ионов. В результате под действием магнитного поля дипольные

моменты цепочной структуры моделей и частиц пара воды выстраиваются в последовательные цепочки соединения, где, на основе закона физики, происходит присоединение положительного знака потенциала напряженности дипольного момента, нижестоящего, кластера (структурно из молекул построенной, кристаллической решетки оксониевой модели) к отрицательному знаку потенциала, сверху стоящего, дипольного момента кластера (также, как это соответствует соединению химических гальванических элементов в батарею), что составляет сумму напряженности дипольных моментов кластеров в цепочном соединении

$$E_{\Sigma 1} = E_1 + E_2 + \dots + E_n, \quad (2)$$

которая, являясь напряженностью электрического поля цепочки диполей и, как векторная величина, также отображается в алгебраической теории сложения коллинеарных векторных величин напряженности дипольных моментов кластеров парового облака в виде потенциальной энергии ЭДС<sub>1</sub> многомиллионной величины напряженности электростатического потенциала, где "n" определяет количество кластеров в последовательном цепочном соединении, длина которого равна средней высоте парового облака, а сами вертикальные последовательно построенные цепочные соединения кластеров, путем гетерополярной связи, соединяются в параллельные соединения электрических цепей парового облака и уже представляют собой большое метастабильное плазменное облако соединения кластеров, что является процессом фазового перехода воды с обычным физическим свойством диэлектрика второго класса, в воду с физическим свойством сегнетоэлектрика, когда образуется условие соответствия закону Кулона и в паровом облаке возникает условие электропроводности. В результате на противоположных поверхностях облака сосредотачивается совокупный многомиллионный электростатический потенциал ЭДС<sub>1</sub> напряженности дипольных моментов, равной суммарной величине напряженности каждого дипольного момента всех кластеров облака, соединенных в последовательные цепочки с суммарной результирующей:

$$E_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^n \Delta E_i \quad (3)$$

и емкостью заряда

$$Q = 2n \cdot \sum_{i=1}^k f(p_i) \Delta N_i m, \quad (4)$$

где  $n$  – число диполей в площади поперечного сечения облака,  $p$  – электрический момент единицы объема. Такая ориентация напряженности дипольных моментов кластеров облака, где верхняя часть облака имеет положительный потенциал, а нижняя часть отрицательный.

Облако под действием тепла или резких порывов фронтальных ветровых холодных и тепловых потоков подвергается механическим деформирующим воздействиям сил сдвига, сжатия и растяжения, что может привести это огромное сегнетоэлектрическое плазменное паровое облако к рекомбинации каждого кластера объема метастабильной плазмы, состоящей из

цепочной структуры построения парообразного облака, что выделяет на противоположных поверхностях облака дополнительную кинетическую энергию ЭДС<sub>2</sub> в виде электростатического напряжения:

$$E_{\Sigma 2} = \sum_{i=1}^n f(m_i) \Delta E_i, \quad (5)$$

Процесс рекомбинации, выглядит подобно явлению пьезоэлектрического эффекта, что способствует суммарному выделению энергии ЭДС<sub>1</sub> + ЭДС<sub>2</sub>, величина, напряженности которой  $E_1 + E_{\Sigma 2}$  превысит величину диэлектрической проницаемости воздушного пространства и произведет на соседнее облако молниенный разряд, плазма которого подвергнется температурному воздействию, что вызовет мгновенную лавинообразную цепную реакцию рекомбинации всей плазмы структурного построения сегнетоэлектрического облака, которое фактически представляет собой дипольно-молекулярный низкотемпературный реактор [3, с. 202], и процесс цепочной реакции рекомбинации метастабильной плазмы реактора происходит на атомно-молекулярном уровне, что соответственно выразится активизацией реактора с выбросом электрического молниенного разряда и выделением большого количества тепла взрывного характера, а также излучением ионно-радиационной энергии, которую исследователь Прайс из Израиля наблюдал в мезосфере в виде Спрайтов, Джетов и Эльф.

#### ЯВЛЕНИЕ ПРИРОДЫ – ГРОЗА

Именно происхождение лавинообразно мгновенных цепочных реакций рекомбинационных процессов сегнетоэлектрических метастабильных плазм облака наблюдаются в атмосфере, и в каждом отдельном случае происходит взрыв фрагментарной поляризованной облачной массы [3, с. 189], что сопровождается мощным взрывным динамическим хлопком, т.е. громом. Как утверждают многие исследователи, при этом наблюдаются в атмосфере и радиационные излучения. Еще Стаханов И.П. в своем труде "О физической природе шаровой молнии" отметил, что были сведения от нескольких человек, сообщивших ему, что еще до черныбыльских событий они случайно попали под грозовую ливень, в результате чего получили радиационные облучения. В момент прохождения мгновенной цепной реакции рекомбинации грозового облака, т.е. момент взрыва облака, сопровождается выделением огромного количества тепла, под действием которого в облаке происходит атомный распад с выделением радиационного излучения [3, с. 188], которое некоторые исследователи наблюдали в мезосфере в виде светового ионных излучений, называемых Спрайтами и Эльфами. Когда слышны один за другим раскаты грома, то в атмосфере в данный момент происходит непрерывная череда взрывов и опять же это взрывы фрагментарных облачных масс. Взрыв, происходящий в атмосфере вследствие мгновенной цепной реакции рекомбинации метастабильной плазмы парового облака, подобен атомному взрыву, но с менее мощным выделением взрывной энергии [3, с. 186], так как распад плазмы, т.е. выделение энергии распада гетерополярной связи структурного построения

дипольно цепочных соединений кристаллических решеток метастабильной сегнетоэлектрической плазмы облака, происходит не на уровне реакции расщепления атома, а на уровне атомно-молекулярного распада структуры дипольно молекулярного построения вещества. Линейная же молния по природе своей есть предвестник взрыва и разряжается менее шумно, ибо электрическая энергия линейной молнии, соскользнув с облака и преодолев диэлектрическую прочность воздуха, при прохождении от облака к объекту, будучи электрическим током огромной мощности разряда, распределяется по всей длине линии канала разряда, где в канале разряда присутствует некий физический определитель проводника, называемый омическим сопротивлением проводника, то есть сопротивлением воздуха, в результате чего, электрическое напряжение линейной молнии рассредоточивается по цепи сопротивления разрядного канала, что не позволяет молнии мгновенно, со всей мощью молниенного разряда, обрушиться ударом по объекту. Удар молниенного разряда еще не взрыв, а всего лишь электрический разряд, непроизводящий шум. Конвективные, турбулентные и вихревые ветровые потоки в грозовых облаках механически воздействуют и изменяют структурно симметричное построение кристаллических решеток частиц пара, что, в случае не лавинообразного процесса рекомбинации кластеров облака, приводит к дополнительному, но постепенному выделению, на поверхностях облака, напряженности кинетической ЭДС<sub>2</sub>, которая намного превышает первичную величину напряженности потенциальной ЭДС<sub>1</sub>, также расположенной на поверхностях поляризованного парового облака, где обе величины энергии ЭДС<sub>1</sub> и ЭДС<sub>2</sub>, суммируются в ЭДС<sub>Σ</sub>. Величина суммарной ЭДС<sub>Σ</sub> напряженности энергии, вносит дисбаланс между величиной диэлектрической проницаемости воздушных пространств, отделяющих поляризованное облако от ближайших объектов, и величиной электрической напряженности поляризованного облака. Вследствие значительного увеличения ЭДС<sub>Σ</sub> возникает ионизация воздушного атмосферного пространства, окружающего облако и, по образовавшейся ионной короне, заряд соскальзывает с облака, образуя молниенный электрический разряд. Момент соскальзывания электрического заряда с облака, как правило, сопровождается бесшумным проблеском молниенного разряда. Однако, не следует забывать, что рекомбинируемая плазма парового облака, став нейтральным облаком с обычным физическим свойством воды и такое облако, еще неуспешное выпасть радиационным дождем, под воздействием внешних условий может вновь и при этом неоднократно поляризоваться, и моментально преобразовавшись в сегнетоэлектрическое грозовое облако, со всеми вытекающими из этого последствиями, может опять взрываться.

#### ФАЗЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГРОЗЫ

Грозовое явление имеет две фазы образования. Фаза зарождения грозы начинается с частичной поляризации кучевых облаков, когда кучевые облака растут как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, при этом восходящие потоки состоят из частиц пара, где

каждая частица пара образуются из одной или небольшой группы кристаллических решеток, а кристаллические решетки формируются на основе определенного количества молекул, которые под воздействием напряженности внешнего магнитного поля стремятся повернуть свои дипольные моменты, ориентируя их, против направления действия магнитного поля. Процесс поляризации кучевых облаков происходит на уровне образования последовательно-параллельного соединения самих частиц пара и их кристаллических решеток на основе гетерополярных связей в цепочные соединения подобно соединению гальванических элементов в батарею, но так как в соединениях участвуют только диполи молекул стоящих по краям частиц пара и их кристаллических решеток, то из-за отсутствия внутрисистемного взаимодействия частиц облака пара, не действует закон Кулона токопроводимости парового облака и потому облако оказывается поляризованным, но в целом с зарядом равным нулю. Однако во второй половине дня частично поляризованное облако, при некотором понижении температуры атмосферного воздуха, что приводит облако к условиям полной поляризации, то есть к условию температурного перехода пара через точку Кюри. На стадии же зрелости в облаке одновременно присутствуют восходящие, и нисходящие воздушные потоки. Если для перехода фазы зарождения к фазе действия грозы нет достаточных условий, то первая фаза не перейдет к выполнению второй фазы. При этом облако может начать свою диссипацию. Постепенно испаряя частицы пара со всех своих боков, облако, так сказать, растворяется в атмосферном пространстве, перемешивая поляризованные частицы пара, с находящимися в атмосфере неполяризованными частицами пара. Скорость растворения облака в атмосфере будет зависеть от интенсивности поступления в облако частиц разогретого поляризованного пара, что и определит длительность во времени существования поляризованного облака. Фаза же проявления грозы возникает только с образованием фронтальных или циклонических атмосферных холодных ветровых потоков. Резкие порывы ветровых потоков и изменение их направления механически воздействуют и деформируют облако, что приводит к появлению рекомбинационного эффекта сегнетоэлектрического метастабильного плазменного парового облака и к молниевому разряду. Фаза проявления грозы порой сопровождается мощными вращающимися восходящими потоками и создает экстремальные по силе погодные явления, такие, как шквальный ветер и сильные разрушительные смерчи. Конвективность и неустойчивость воздуха приводит к изменению построения общей структуры облака, что проявляется разрывом и фрагментарностью отдельных частей облака, которые при этом не теряют сегнетоэлектрического свойства, находясь в разрыве и располагаясь внутри основного облака. В результате наблюдается как бы мозаичность и многослойность построения облака, а также как бы предполагаемое распределение по облаку разноименных зарядов. Там, где наблюдается многослойность заряда, фактически существует механический разрыв, и есть воздушная атмосферная прослойка. Так, по обе стороны разрыва соседствуют положительные и отрицательные группы зарядов, которые многими исследователями принима-

ются за процесс разделения зарядов. А на самом деле, фактически это два и более фрагментарные облака с сегнетоэлектрическими свойствами, но механически разделенные воздушными разрывами, заполненными диэлектриками, так называемыми, запретными зонами, т.е. воздухом. Такое разделение фрагментарных облаков может опять воссоединиться и, сгруппировавшись, создать единое облако, которое, уже подчиняясь закону Кулона, не осуществляет условие электропроводимости.

**Вывод.** Результатом углубленного познания тайны природного явления, грозное облако предстало, как открытие нового физического сегнетоэлектрического свойства воды. Основываясь на фундаментальных научных достижениях, определивших природу образования четвертого состояния воды, что позволило осуществить разработку принципиально совершенного и очень простого способа производства энергии непосредственно из воды, и так смоделировать природное явление сегнетоэлектрического облака (Патент на корисну модель № 67462 вид 27.02.2012 – "Спосіб роботи плазмового електрогенератора"). Модель сегнетоэлектрического облака создается на основе пара высокого давления, который после раскрутки паровой турбины теплоэлектростанции уже становится ненужным для дальнейшего его использования в технологическом процессе. Однако с применением плазменного электрогенератора пар еще можно повторно употребить для производства дополнительной дешевой электроэнергии и таким образом снизить удельные расходы на добычу электроэнергии, и, как следствие, значительно удешевить себестоимость электроэнергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов М.И. Основы электротехники. М.: Высш. шк. – 1964. С. 29.
2. Пьер Кюри. Избранные труды. "Магнитные свойства тел". М.: Наука. – 1966.
3. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Новый мир, 1996.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kuznecov M.I. Osnovy `elektrotehnik. M.: Vyssh. shk. - 1964. S. 29. 2. P'er Kyuri. Izbrannye trudy. "Magnitnye svojstva tel". M.: Nauka. - 1966. 3. Stahanov I.P. O fizicheskoj prirode sharovoj molnii. M.: Novyj mir, 1996.

Поступила 25.11.2012

*Savich Eduard Vladimirovich,*  
пенсионер, до 1994 г. – заведующий отделом  
ЦЭБОТнефтегаз НИПИАСУтрансгаз  
61004, Харьков, ул. Маршала Конева, 16.  
тел. (057) 62-92-75

*Savich E.V.*

#### **The fourth state of water.**

The fourth state of water is aqueous vapor which, under power action of magnetic-field strength at Curie point at the moment of magnetic phase transition, acquires properties of ferroelectric plasma. The latter is the basis of origination of such natural phenomena as a thunderstorm cloud and a ball lightning capable of releasing, under certain conditions, lightning strokes and, during explosion, plenty of thermal energy, which is typical of a low-temperature reactor.

**Key words – state of water, aqueous vapor, ferroelectric plasma, lightning origination.**

К.М. Василів

**АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ АВТОНОМНОГО ГЕНЕРАТОРА  
З БЕЗКОНТАКТНИМ КАСКАДНИМ ТРИФАЗНИМ МОДУЛЬОВАНИМ  
ЗБУДЖУВАЧЕМ ЗА СХЕМОЮ В ОДНУ ЗІРКУ І СПІЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ ФАЗ  
МОДУЛЯТОРА ПІД ЧАС РОБОТИ НА ВУЗОЛ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**

*Методом математичного експерименту виконано дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазним модульованим збуджувачем. Проведено аналіз процесів на предмет роботоспридатності системи живлення під час її роботи на вузол асинхронних двигунів. Встановлено закономірності перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів залежно від величини навантаження та параметрів системи керування комутатором.*

*Методом математического эксперимента выполнено исследование электромагнитных и электромеханических процессов, происходящих в автономной системе электропитания на базе асинхронизированного генератора с трехфазным модулированным возбудителем. Произведен анализ процессов на предмет работоспособности системы питания при ее работе на узел асинхронных двигателей. Установлено закономерности протекания электромагнитных и электромеханических процессов в зависимости от величины нагрузки и параметров системы управления коммутатором.*

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

Автономні системи електроживлення (АСЕЖ) на базі асинхронізованого генератора (АСГ) з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем (БКМЗ) належать до перспективних бо вони характеризуються високим рівнем надійності в роботі і високим рівнем стабілізування частоти напруги генератора за умов змінної швидкості обертання ротора.

На сьогодні вже виконано дуже важливий обсяг робіт, пов'язаний з розробкою концепції систем електроживлення на базі АСГ з БКМЗ. Так, в [7] започатковано теоретичну концепцію генераторів стабільної частоти на базі АСГ з БКМЗ. Доведено, що стабілізування частоти напруги генератора на підставі явища модуляції напруги безконтактного збуджувача дає змогу отримати ідеальну якість напруги за критерієм гармонічного спектра напруги генератора завдяки живленню обмотки збудження струмом частоти ковзання, що в таких системах забезпечує стабільну швидкість обертання магнітного поля стосовно обмотки статора генератора, а це, своєю чергою, ідеально стабільну частоту напруги генератора.

Самоочевидним є те, що на підставі самих теоретичних засад принципово неможливо отримати достатньої з погляду практичних потреб інформації стосовно перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів як в якісному, так, тим паче, в кількісному еквіваленті. Тому, для вивчення закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в таких системах, виконано великий обсяг робіт з розробки методів, математичних моделей та на їх підставі алгоритмів і програмних комплексів, які за допомогою сучасних інформаційних технологій дають змогу проводити всебічні дослідження з метою оптимізування параметрів структурних компонентів таких СЕЖ. (до цих компонентів належать: машини модулятора, сам асинхронізований генератор, комутатор циклоконверторного типу), а також параметри системи керування (СК) комутатором і параметри системи автоматичного керування (САК), зокрема, стабілізування амплітуди напруги асинхронізованого генератора. Ця масштабна робота відображена в низці наукових праць [1-6], серед яких [4], в якій найбільш повно систематизовано отримані результати.

Електромагнітні і електромеханічні процеси, які відбуваються в таких системах електроживлення належать до особливо складних з погляду характеру визначальних координат та їх функційних взаємозв'язків. Це зумовлено доволі складною будовою

цих систем електроживлення. Складність будови таких систем електроживлення в поєднанні зі складністю характеру перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в цих системах, однозначно вказує на те, що безпосередня розробка систем живлення такого типу має ґрунтуватися на всебічних ретельних теоретичних та практичних наукових дослідженнях як стосовно схемних рішень силового електричного кола, так і стосовно закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів з врахуванням природи споживачів електроенергії. Результати одного з таких досліджень, яке стосується вивчення закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів та їх впливу на функціонування автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем (за схемою модулятора з спільним з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора) під час роботи генератора на вузол асинхронних двигунів і становлять предмет цієї статті.

**АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ**

Важливо зазначити, що результати досліджень, які тут подаються, ґрунтуються на результатах попередніх досліджень, які тісно пов'язані як з розробкою методів і математичних моделей АСЕЖ на базі АСГ з БКМЗ, так і (певною мірою) з результатами, отриманими з безпосереднього аналізу процесів, які відбуваються в цій же системі електроживлення під час її роботи на активно-індуктивне живлення [5, 6].

Перші математичні моделі піддослідної системи електроживлення, які відзначалися доволі високим рівнем адекватності (давали змогу моделювати динамічні електромагнітні і електромеханічні процеси) були опубліковані в [1, 2]. Характерною особливістю цих математичних моделей є те, що в них не передбачено наявності руйнів ротора генератора, що істотно обмежує їх можливості в плані дослідження перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів системи. Безумовно, що такі обмеження становили істотний недолік математичних моделей. Тому, на наступному етапі були розроблені математичні моделі, які дають змогу моделювати динамічні електромагнітні та електромеханічні процеси з врахуванням наявності в моделі руйнів ротора генератора [3, 4].

© К.М. Василів

## ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

З теорії систем генерування на базі асинхронізованого генератора з БКМЗ [7] відомо, що ці системи можуть формуватися за низькою сімейств схем силового електричного кола, які однозначно мають принциповий вплив на характер перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів. Очевидним також є те, що на перебіг процесів впливає вид навантаження (тобто тип споживачів) та їх режими роботи. Тому завдання дослідження таких систем загалом полягає в вивченні закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів для кожної з можливих схем силового електричного кола (модулятора, генератора і комутатора), а також для кожного з видів споживачів електроенергії їх параметрів та режимів роботи. В цьому контексті в [5, 6] проведено дослідження функціонування автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку і спільним та комбінованим, відповідно, з'єднанням фазних гілок машин модулятора під час роботи на активно-індуктивне навантаження. У [5, 6] показано, що схема силового електричного кола модулятора має істотний вплив на перебіг процесів, а значить на функційні можливості системи генерування загалом. Результати досліджень, отримані в цих двох публікаціях вказують на те, що більш стійку роботу систем забезпечує схема модулятора з комбінованим з'єднанням фазних гілок ротора машин модулятора.

Цілком логічним є запитання: чи матимуть місце аналогічні тенденції (а, якщо так, то яким чином вони проявлятимуться) під час роботи цієї ж СЕЖ на вузол асинхронних двигунів. Тому, в цій статті ставиться за мету отримати кваліфіковану і науково обгрунтовану відповідь на поставлене актуальне запитання. А отримаємо його шляхом аналізу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем за схемою модулятора в одну зірку під час роботи системи електроживлення на вузол асинхронних двигунів.

Таким чином, на підставі викладеного вище, констатуємо, що задача дослідження в цій статті полягає в аналізі електромагнітних і електромеханічних процесів автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним безконтактним каскадним модульованим збуджувачем зі спільним з'єднанням фаз модулятора за схемою генератора в одну зірку під час роботи системи електроживлення на вузол асинхронних двигунів.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Отже, враховуючи те, що об'єктом аналізу процесів системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазним безконтактним каскадним модульованим збуджувачем є АСЕЖ за схемою зі спільним з'єднанням фаз роторів машин модулятора, схема силового електричного кола піддослідної системи електроживлення має вигляд, зображений на рисунку 1. З цього рисунку видно, що структурними елементами схеми слугують: дві асинхронні машини АМ1 та АМ2; два джерела живлення цих машин Е1 та Е2 відповідно; безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ); генератор АГ, яким слугує асинхронна машина, фази обмотки ротора якої

з'єднані в зірку. До системи електроживлення також входять три споживачі (асинхронні двигуни): АД1, АД2, АД3. Ключі  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  призначені для вмикання та відмикання асинхронних двигунів.

Решта позначень на схемі рис. 1 мають такий зміст. Літерами  $\varphi$ ,  $i$ ,  $E$  позначено: потенціали, струми та електрорушійні сили. Літерами  $F$ ,  $G$ ,  $D$  в нижніх індексах відповідно позначено належність координат до модулятора, генератора, та асинхронних двигунів. Літерами  $S$ ,  $R$  в нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора електричних машин. Цифрами в нижніх індексах позначені номери електричних гілок у межах кожного із структурних елементів, а цифрою "0" в нижньому індексі – вузли з нульовим потенціалом. Цифрами в круглих дужках (1) і т. д. у верхньому індексі позначено належність відповідних величин до АМ1, АМ2 та джерел живлення модулятора Е1 і Е2, а також асинхронних двигунів АД1, АД2, АД3.

Зі схеми силового електричного кола системи живлення рис. 1 видно, що кожна з фаз обмоток роторів АМ1 та АМ2 розділені на три гілки, які з боку виходу з АМ2 і входу до АМ1 з'єднані між собою послідовно з перехрещенням фаз. Саме таке сполучення АМ1 та АМ2 утворює функційний структурний елемент, який забезпечує модуляцію напруги і тому називається модулятором [7].

Суть дослідження полягає в розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів, результатом якого є отримання розрахункових функційних залежностей миттєвих значень всіх визначальних координат: струмів, потенціалів та напруг, а також швидкості обертання ротора генератора, машин модулятора. Важливу інформацію з погляду роботопридатності системи електроживлення мають також координати асинхронних двигунів: швидкості обертання, електромагнітні моменти, струми, а також активні потужності.

Дослідження автономній системі електроживлення проведемо для асинхронізованого генератора потужністю 100 кВт. Моделювання процесів виконаємо для режиму, в якому задане ковзання ротора генератора є постійним і таким, що відповідає синхронній швидкості, тобто дорівнює нулеві. На початковій стадії робочого циклу АСЕЖ вмикається рушій та виконується розгін ротора генератора. При досягненні швидкості обертання ротора близької до синхронної вмикається напруга живлення машин модулятора, тобто вмикається збудження. На наступній стадії робочого циклу системи виконується почергове вмикання трьох асинхронних двигунів АД1, АД2, АД3, а на останньому етапі виконується почергове відмикання в зворотній послідовності раніше ввікнених двигунів: АД3, АД2, АД1.

Для моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в піддослідній системі електроживлення для заданого режиму робочого циклу споживачами підібрані три асинхронні двигуни потужністю по 8 кВт. Вважається також, що виконавчі механізми асинхронних двигунів мають ідентичні вентиляторні механічні характеристики. Зазначимо, що протягом цілого робочого циклу функціонують система автоматичного керування для стабілізування швидкості обертання ротора та система автоматичного стабілізування амплітуди фазних напруг асинхронізованого генератора.



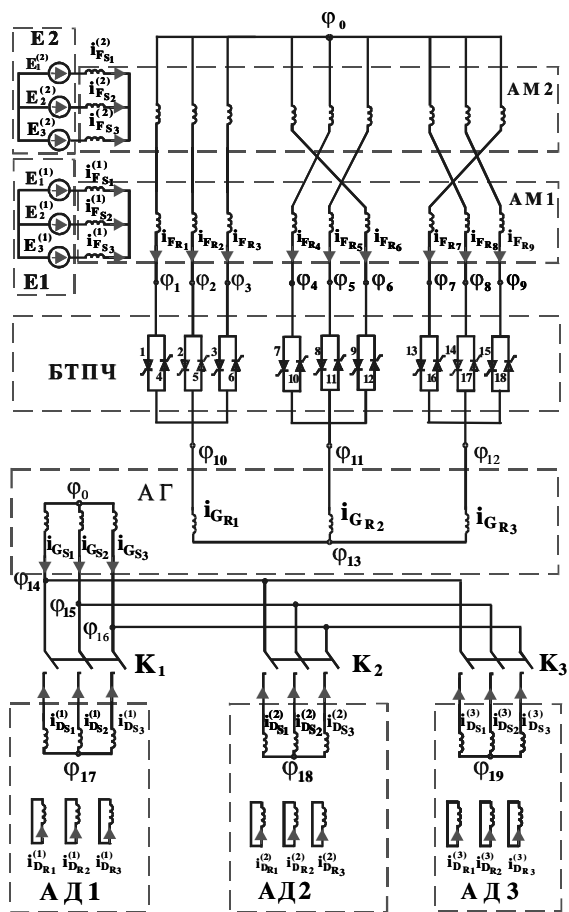


Рис. 1. Схема силового электричного кола АСЕЖ

Про якість електроенергії за найважливішими критеріями її оцінки (до яких окрім частоти віднесемо стабільність амплітуди напруги генератора), а також про роботоздатність системи генерування цього класу загалом можна робити висновки на підставі аналізу характеру розрахункових залежностей таких інтегральних координат як модулі зображувальних векторів (амплітуд) фазних напруг і струмів статора та модуля зображувального вектора струмів фаз ротора генератора  $u_{G_s}^v, i_{G_s}^v, i_{\mu}^v$ . Тому, аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів розпочнемо саме з розгляду цих важливих координат. За результатами моделювання побудовані розрахункові залежності зазначених вище координат  $u_{G_s}^v, i_{G_s}^v, i_{\mu}^v$ , які зображені на рис. 2. Характер кривих цих координат відображає повний робочий цикл АСЕЖ за окремими його етапами. На першому етапі (за час від  $t = 0$  до  $t = 3$  с) рушій розкручує ротор генератора до синхронної швидкості. В момент часу  $t = 3$  с вмикається збудження. Тому, на наступному відтинку спостерігається поява і зростання струму збудження (струму в обмотках ротора генератора) і, як наслідок, поява та зростання напруги статора генератора. Генератор працює в режимі неробочого ходу на проміжку від  $t = 3$  до  $t = 5$  с. До моменту часу  $t = 5$  с амплітуди фазних напруг досягли заданого значення, яке дорівнює 311 В. Починаючи з моменту часу  $t = 5$  с, щосекунди вмикаються асинхронні двигуни в такій послідовності: АД1, АД2, АД3. На проміжку часу від  $t = 7$  до  $t = 9$  с генератор працює на всі три споживачі. А, починаючи з  $t = 9$  с, двигуни відмикаються в зворотній до увімкнення послідовності: АД3, АД2, АД1.

З форми кривої модуля зображувального вектора фазної напруги статора генератора видно, що амплітуда напруги є стабільною, а в області перехідних процесів, спричинених увімкненням та відмиканням асинхронних двигунів, перебуває в допустимих стандартами межах відхилення від заданого значення. З рис. 2 також видно, що система автоматичного керування виконує свою функцію стабілізації амплітуди напруги статора генератора, а інші координати (струми та напруги) відображають поведінку системи в межах повного робочого циклу (неробочого ходу, почергового вмикання асинхронних двигунів, їх роботи в режимі повного навантаження та почергового їх відмикання).

Вирішальну роль у забезпеченні необхідного характеру цих координат відіграє стійкість роботи комутатора. А це залежить від багатьох чинників, серед яких: параметри машин модулятора і генератора, параметри і алгоритм функціонування системи керування комутатором та системи автоматичного керування стабілізування визначених координат (тут амплітуди фазних напруг статора генератора), а також вид, параметри та режими роботи споживачів. Однозначно, що на стійкість роботи системи мають великий вплив схеми сполучення фаз ротора генератора, а також схеми сполучення машин модулятора, що і є предметом аналізу процесів цієї праці.

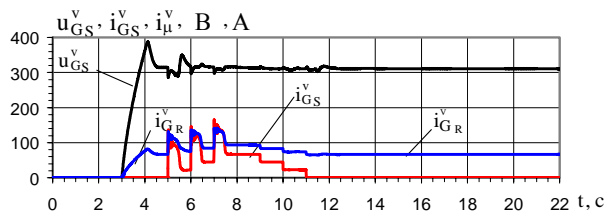


Рис. 2.  $u_{G_s}^v, i_{G_s}^v, i_{\mu}^v$  модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та фазних струмів ротора генератора

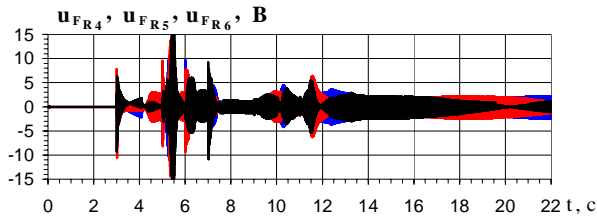
Важливу роль у функціонуванні системи збудження і АСЕЖ загалом відіграє перебіг електромагнітних процесів у модуляторі. Тому перейдемо до аналізу напруг та струмів модулятора.

На рис. 3 зображено розрахункові залежності від часу миттєвих значень спадів напруг та струмів середньої групи фазних гілок роторів машин модулятора. Рис. 3,а ілюструє миттєві значення спадів електричних напруг  $u_{F_{R_4}}, u_{F_{R_5}}, u_{F_{R_6}}$  на IV, V, VI послідовно з'єднаних фазних гілках роторів машин модулятора: Відповідно, на рис. 3,б зображені розрахункові залежності струмів  $i_{F_{R_4}}, i_{F_{R_5}}, i_{F_{R_6}}$  IV, V, VI фазних гілок роторів машин модулятора.

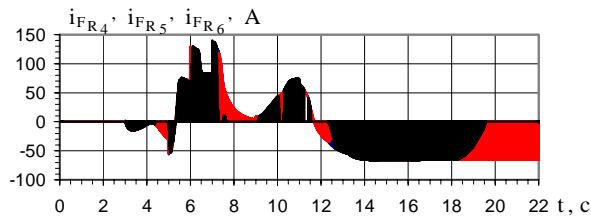
Криві на рис. 3 виразно відображають фізику процесів, внаслідок яких отримано електричні напруги модульованої форми частоти ковзання. Як бачимо з рис. 3, на проміжку часу, де ковзання дорівнює нулеві ( $S = 0$ ), спостерігаємо напруги без модуляції частотою заповнення  $f_3 = 150$  Гц. Оскільки фазні напруги зсувні між собою на  $120^\circ$ , а розгалужені фазні гілки роторів АМ1 та АМ2 для другої та третьої фазних груп сполучені між собою перехресно зі зсувом на  $120^\circ$  (див. схему рис. 1), то за частотою модуляції кожна з трьох трифазних систем напруг та струмів також зсувні між собою на кут  $120^\circ$ . Амплітуди напруг змінюються залежно від зміни електрорушійних сил джерел живлення, а ця, своєю чергою, таким чином, щоб підтримувати потрібне значення

струму збудження, адекватно реагуючи на величину навантаження генератора.

З рис. 3 видно, що криві напруг мають модульовану форму з частотою ковзання і частотою заповнення, значення якої залежить від швидкості обертання ротора генератора і співвідношення кількості пар полюсів машин модулятора [7].



а –  $u_{FR4}$ ,  $u_{FR5}$ ,  $u_{FR6}$  – миттєві напруги IV, V, VI фазних гілок роторів машин модулятора;



б –  $i_{FR4}$ ,  $i_{FR5}$ ,  $i_{FR6}$  – миттєві струми IV, V, VI фазних гілок роторів машин модулятора;

Рис. 3. Розрахункові залежності миттєвих значень напруг та струмів IV, V, VI фазних гілок роторів машин модулятора

З рис. 3 видно, що модулятор, згідно з теоретичним передбаченнями виконує свою функцію – утворення напруг модульованої форми, необхідних для формування циклоконвертером трифазної системи струмів частотою ковзання.

Структурні елементи АСЕЖ перебувають у стані взаємного зв'язку. Тому, будь-які збурення в одному з них неминуче відповідно впливають на процеси в усіх інших. У випадку цього режиму джерелом таких збурень слугує вмикання та відмикання асинхронних двигунів, що призводить до зміни швидкості обертання ротора генератора. Очевидно, що напруги та струми фазних гілок роторів машин модулятора також повинні реагувати на ці збурення. З візуального аналізу форми кривих напруг та струмів, зображених на рис. 3 виразно видно, що криві цих напруг зазнають істотного деформування яке, спричинено перехідними процесами, які, своєю чергою, виникли внаслідок вмикнення та відмикнення навантаження.

Визначальний вплив на перебіг процесів у таких системах та їх функціонування загалом мають процеси в обмотці збудження генератора. Тому, інформація про характер електричних струмів та напруг у обмотці ротора генератора має принципово важливе значення. Проаналізуємо розрахункові залежності фазних напруг та струмів ротора генератора, які зображені на рис. 4 та 5 відповідно. З рис. 4 видно, що характер фазних напруг ротора генератора відображає закономірності електромагнітних процесів, які відбуваються в модуляторі. В наслідок роботи комутатора в обмотці ротора генератора формується трифазна система напруг частоти ковзання. На дільницях постійної швидкості обертання ротора генератора частота напруг дорівнює нулеві, тобто маємо випрямлену постійну напругу. Зміна амплітуди напруги на дільни-

цях, де вона змінна і значення напруги на дільницях, де вона постійна, визначається зміною амплітуд модульованих напруг на виході модулятора (див. рис. 3).

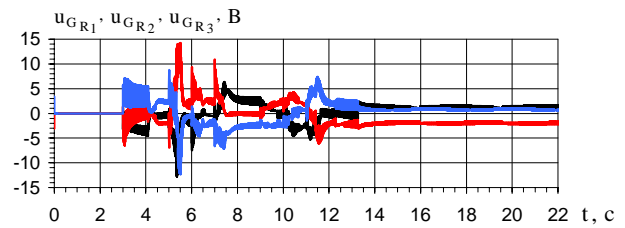


Рис. 4.  $u_{GR1}$ ,  $u_{GR2}$ ,  $u_{GR3}$  – фазні напруги ротора АГ

Фазні напруги ротора генератора частоти ковзання дають підставу на сподівання отримати фазні струми ротора генератора аналогічної форми. На рис. 5 зображені розрахункові залежності від часу фазних струмів ротора генератора. Характер кривих цих струмів вказує на те, що безконтактна система збудження на базі каскадного модулятора дає змогу отримати струм збудження генератора частоти ковзання, що, своєю чергою, забезпечує постійну швидкість обертання магнітного поля генератора стосовно обмотки статора, а значить і постійну частоту напруги генератора не залежно від частоти обертання ротора генератора. Водночас, форма кривих на цьому рисунку виразно вказує на те, що модульований перетворювач частоти дає змогу отримати високоякісні струми збудження, що слугує необхідною передумовою для отримання високоякісної напруги генератора за критерієм гармонічного спектра.

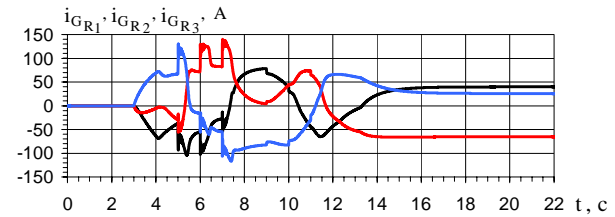


Рис. 5.  $i_{GR1}$ ,  $i_{GR2}$ ,  $i_{GR3}$  – фазні струми ротора АГ

Для повноти інформації стосовно закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів системи електроживлення загалом розглянемо розрахункові залежності основних електромеханічних координат асинхронних двигунів.

На рис. 6 зображені такі розрахункові залежності трьох асинхронних двигунів: електромагнітних моментів (рис. 6,а), частот обертання роторів (рис. 6,б), зображувальних векторів струмів статорів (рис. 6,в) та активної потужності (рис. 6,г). Характер кривих цих функційних залежностей є очікуваним і в якісному, і в кількісному відношенні. Криві на рис. 6 переконливо вказують на те, що піддослідна система електроживлення забезпечує нормальну роботу споживачів, якими слугують три асинхронні двигуни.

З наведених вище результатів моделювання (рис. 2-6) видно, що всі розрахункові залежності є функційно пов'язані, що вказує на роботопридатність системи електроживлення принципово. Проте, для отримання достовірної інформації стосовно функційних можливостей цієї системи електроживлення необхідно провести широкомасштабні дослідження на предмет функційних можливостей системи для широкого діапазону навантажень, а також на предмет впливу на роботу системи таких важливих чинників, до яких

належать параметри системи керування комутатором і зокрема значення вставки за струмом. Спеціальні дослідження показали, що під час високих динамічних навантажень проявляються вади схеми модулятора зі спільним з'єднанням фазних гілок роторів його машин. Сутність цієї проблеми полягає в тому, що для такої схеми модулятора в межах кожної з трьох окремих трифазних груп можливими є контури, замкнені на фазні гілки машин модулятора через зустрічно направлені вентиля (див. рис. 1.). За певних обставин (високих динамічних навантажень і несприятливих параметрів системи керування) вентиля комутатора перекидуються і в утворених (практично короткозамкнених контурах) протікатимуть недопустимо великі струми, що безперечно негативно впливатиме на роботу як модулятора, так і системи генерування загалом. На рис. 7 зображені струми фазних гілок машин модулятора для щойно описаного випадку, коли вставка за струмом має значення  $h = 0,01$  А. Характер і значення струмів на рис. 7 вказують на те, що такий режим є аварійним, а для його уникнення необхідно запобігти утворенню короткозамкнених контурів. Очевидним є те, що одним з найефективніших способів вирішення цієї проблеми є зміна схеми силового електричного кола модулятора безконтактної системи збудження.

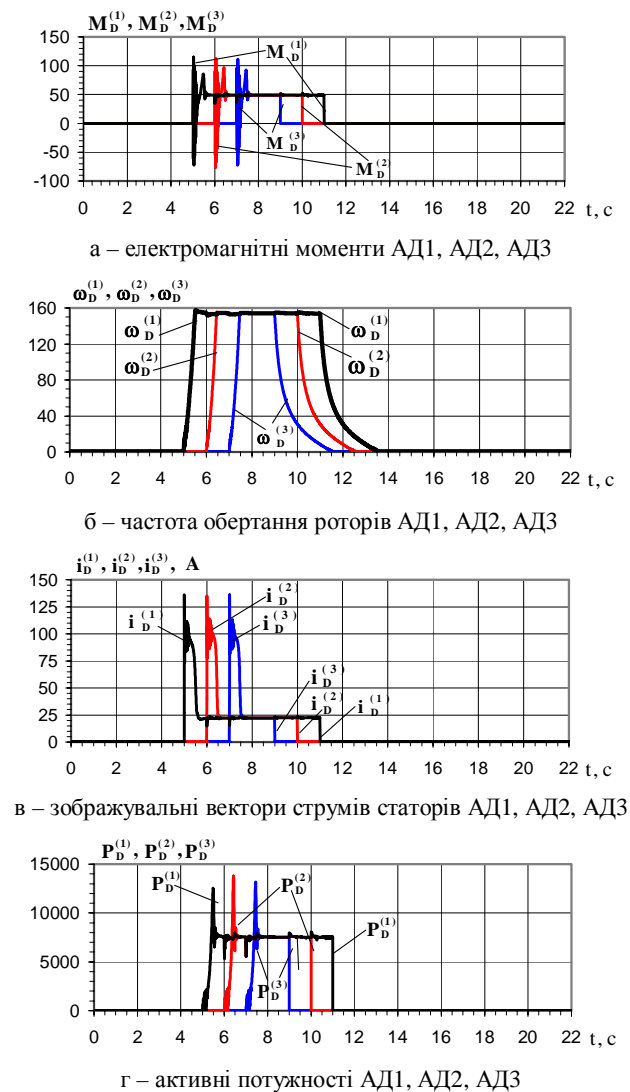


Рис. 6. Розрахункові залежності основних електромеханічних координат асинхронних двигунів

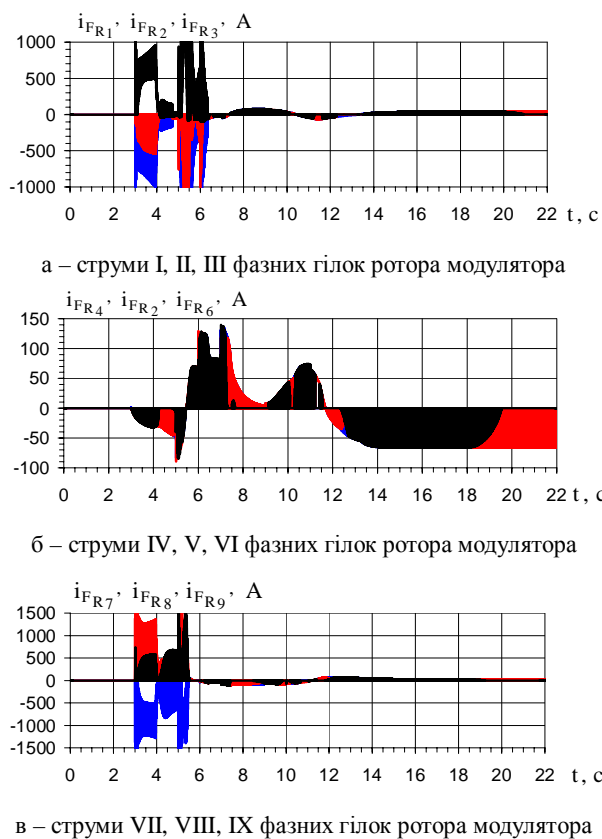


Рис. 7. Розрахункові залежності фазних струмів ротора машин модулятора

Наведених вище результатів математичного моделювання автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним безконтактним каскадним модульованим збуджувачем за схемою силового електричного кола в одну зірку і спільним з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора цілком достатньо для формування висновків стосовно закономірностей перебігу електромеханічних і електромеханічних процесів, які відбуваються в цій системі електроживлення та її роботопридатності.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз електромеханічних та електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним безконтактним каскадним модульованим збуджувачем за схемою генератора в одну зірку зі спільним з'єднанням фазних гілок роторних обмоток машин модулятора під час її роботи на вузол асинхронних двигунів, показує, що принципово ця система електроживлення є роботопридатною.

2. На стійкість роботи комутатора і системи живлення загалом істотний вплив мають параметри навантаження асинхронних двигунів. Збільшення механічного навантаження асинхронних двигунів понад критичне значення порушує стійкість роботи комутатора і систем електроживлення загалом.

3. Стійкість роботи АСЕЖ істотно залежить від такого важливого параметра системи керування комутатором як вставка за струмом. За результатами дослідження встановлено, що оптимальне значення вставки за струмом визначається діапазоном від  $h = 0,02$  А до  $h = 0,04$  А.

4. Критично порушує стійкість роботи АСЕЖ на базі АСГ з БКМЗ за схемою модулятора зі спільним

з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора перекидування вентилів комутатора. Це пояснюється тим, що за таких обставин у схемі силового електричного кола окремих трифазних груп роторів машин модулятора утворюються короткозамкнені контури, які замикаються через фазні гілки роторів машин модулятора та робочі (нормально відкриті) і неконтрольовано відкриті (перекинуті) вентиля циклоконвертора, оминаючи фазні гілки ротора генератора (див. рис. 1). Це призводить до зростання (щонайменше на порядок порівняно з номінальним значенням) струму у фазних контурах роторів машин модулятора, що є недопустимим, а також до дисбалансу фазних струмів ротора генератора і, як наслідок, коливання магнітного потоку (зменшення його середнього значення), що негативно впливає на стабільність амплітуди напруги генератора.

5. Алгоритмом функціонування системи керування комутатором на одному з етапів роботи вентилів загалом передбачено відкриття вентилів у інверторному режимі, що істотно збільшує ймовірність перекидування вентилів. Висока ймовірність перекидування вентилів комутатора і виникнення коротких замикань у контурах роторів машин модулятора критично знижує рівень надійності функціонування автономних систем електроживлення за схемою генератора в одну зірку і спільним з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора.

Тому, на підставі наведених результатів аналізу закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора за схемою в одну зірку і спільним з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора логічним є висновок про недоцільність застосування на практиці таких схем модулятора.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Василів К.М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К.М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 2. – С. 54-60.
2. Василів К.М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К.М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 50-55.
3. Василів К.М. Узагальнена математична модель автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем за нульовою схемою / К.М. Василів // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 15-20.
4. Василів К.М. Методи і моделі аналізу процесів автономних систем електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем: дис. доктора техн. наук: 05.09.03 / Василів Карл Миколайович. – К., 2010. – 398 с.
5. Василів К.М. Аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку і спільним з'єднанням фаз модулятора під час роботи на активно-індуктивне навантаження / К.М. Василів // Вісник НТУ "ХПІ". – 2012. – № 49. – С. 27-37.

6. Василів К.М. Порівняльний аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку під час роботи на активно-індуктивне навантаження / К.М. Василів // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 1. – С. 12-16.
7. Галиновский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты / Галиновский А.М. // Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по Электромехатронике. – Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. – 1997. – С. 182-192.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vasiliv K.M. Matematichna model' dinamichnih procesiv avtonomnoi elektroenergetichnoi sistemi na bazi bezkontaktnogo asinhronizovanogo generatora z dvofazno-trifaznim kaskadnim modul'ovanim zbudzhuvachem / K.M. Vasiliv // Tehnichna elektrodinamika. - 2005. - № 2. - S. 54-60. 2. Vasiliv K.M. Matematichna model' dinamichnih procesiv avtonomnoi elektroenergetichnoi sistemi na bazi bezkontaktnogo asinhronizovanogo generatora z trifazno-trifaznim kaskadnim modul'ovanim zbudzhuvachem / K.M. Vasiliv // Tehnichna elektrodinamika. - 2004. - № 5. - S. 50-55. 3. Vasiliv K.M. Uzagal'nena matematichna model' avtonomnoi elektroenergetichnoi sistemi na bazi asinhronizovanogo generatora z bezkontaktnim kaskadnim trifazno-trifaznim modul'ovanim zbudzhuvachem za nul'ovoyu shemoyu / K.M. Vasiliv // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2009. - № 2. - S. 15-20. 4. Vasiliv K.M. Metodi i modeli analizu procesiv avtonomnih sistem elektrozhlivlennya na bazi asinhronizovanogo generatora z bezkontaktnim kaskadnim trifaznim modul'ovanim zbudzhuvachem: dis. doktora tehn. nauk: 05.09.03 / Vasiliv Karl Mikolajovich. - K., 2010. - 398 s. 5. Vasiliv K.M. Analiz procesiv avtonomnogo generatora z bezkontaktnim kaskadnim trifaznim modul'ovanim zbudzhuvachem za shemoyu v odnu zirku i spil'nim z'ednannjam faz modul'yatora pid chas roboti na aktivno-induktivne navantazhennya / K.M. Vasiliv // Visnik NTU "HPI". - 2012. - № 49. - S. 27-37. 6. Vasiliv K.M. Porivnyal'nij analiz procesiv avtonomnogo generatora z bezkontaktnim kaskadnim trifaznim modul'ovanim zbudzhuvachem za shemoyu v odnu zirku pid chas roboti na aktivno-induktivne navantazhennya / K.M. Vasiliv // Visnik NTU "HPI". - 2012. - № 49. - S. 27-37. 7. Vasiliv K.M. Porivnyal'nij analiz procesiv avtonomnogo generatora z bezkontaktnim kaskadnim trifaznim modul'ovanim zbudzhuvachem za shemoyu v odnu zirku pid chas roboti na aktivno-induktivne navantazhennya / K.M. Vasiliv // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2013. - № 1. - S. 12-16. 7. Galinovskij A.M. Beskontaktnyj asinhronizirovannyj generator s modulirovannym preobrazovatelem chastoty / Galinovskij A.M. // Trudy I Mezhdunarodnoj (III Vserossijskoj) konferencii po 'Elektromehanotronike. - Sankt-Peterburgskij gos. 'elektrotehn. un-t. - 1997. - S. 182-192.

Надійшла 02.03.2013

*Василів Карл Миколайович, д.т.н.*  
Львівський національний аграрний університет  
кафедра електротехнічних систем  
79049, Львів, вул. Коломийська, 4, кв. 140  
тел. (0322) 226403, (097) 2453821  
e-mail: karl.vasyliv@gmail.com

*Vasylyv K.M.*

#### **Analysis of processes in an independent generator with a noncontact cascade three-phase modulated exciter via a star-connected circuit with a common modulator phase connection under operation to an induction motors site.**

By means of a mathematical experiment, electromagnetic and electromechanical processes in an independent electric power supply system based on an asynchronous generator with a three-phase modulated exciter are investigated. The processes are analyzed to specify the working capacity of the power supply system during its operation to an induction motors site. Regularities of the electromagnetic and electromechanical processes behavior versus load intensity and the switch control system parameters are identified.

**Key words – asynchronous generator, noncontact modulated exciter, independent power supply system, commutator, induction motor, electromagnetic and electromechanical processes, mathematical experiment.**

## ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДРОБНЫХ ОБМОТОК

*Наведені результати досліджень властивостей поєднаної множини обмоток, яка містить багатофазні обмотки з цілими та дрібними числами пазів на полюс й фазу. Розроблений алгоритм розрахунку коефіцієнтів розподілу обмоток вказаній множини за гармоніками довільних порядків. Визначене аналітичне співвідношення, що дозволяє визначити структуру поєднаної множини обмоток у вигляді сукупності гомологічних кіл.*

*Проведены результаты исследования свойств многофазных обмоток объединенного множества включающего в себя обмотки с целыми и дробными числами пазов на полюс и фазу. Предложены алгоритм расчета коэффициентов распределения обмоток указанного множества по гармоникам произвольных порядков. Определено аналитическое соотношение соответствия гармонических составов обмоток, позволяющие представить структуру объединенного множества в виде совокупности гомологических цепочек.*

Под дробными принято понимать такие обмотки, у которых число пазов  $Z$  на полюс  $p$  и фазу  $m$  не равно целому числу. Таким образом

$$q = \frac{Z}{k_z m p} = \frac{Q}{d},$$

где  $Q = Z/(k_z m)$ ,  $m$  – число пазов на фазную зону,  $d$  – знаменатель дробности,  $k_z$  – коэффициент, равный 1 для  $m$ -зонных и 2 для  $2m$ -зонных обмоток.

Следует различать классические дробные обмотки, характеризующиеся максимально возможным коэффициентом распределения  $k_{Dp}$  по рабочей гармонике  $v=p$ , и нетрадиционные их модификации, характеризующиеся меньшими величинами  $k_{Dp}$  при заданном числе  $q$ .

Формирование классических дробных обмоток выполняется с применением одного из алгоритмов. Первый из них основан на определении шага  $R$  обхода активных катушечных сторон (АКС) одной из фаз [1], обеспечивающего смещение соответствующих полярных векторов ЭДС (МДС) в масштабе рабочей гармоники на угол минимального сдвига. Второй алгоритм предусматривает построение повторяющейся части числового ряда обмотки и соответствующее чередование катушечных групп [2]. Любые отклонения от результатов применения указанных алгоритмов приводят к получению нетрадиционных дробных обмоток, которые в настоящей статье не рассматриваются.

Важно также отметить, что при заданных числе фаз  $m$  и коэффициенте  $k_z$  множество  $W_{1mkz}$  обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу является подмножеством обобщенного множества  $W_{dmkz}$  классических дробных обмоток

$$W_{1mkz} \subset W_{dmkz}.$$

При этом для множества  $M_{1mkz}$  известно и широко используется аналитическое выражение

$$k_{Dv} = \frac{\sin\left(\frac{\pi v}{mk_z}\right)}{q \sin\left(\frac{\pi v}{mk_z q}\right)}, \quad (1)$$

где  $v$  – относительный порядок гармоники.

Классические дробные обмотки до настоящего времени находят достаточно широкое применение в различных типах промышленно выпускаемых электрических машинах. Диапазон изменения параметров  $Q$  и  $d$  таких обмоток в указанных машинах достаточно велик. Поэтому эффективность выполнения гармонического анализа МДС (ЭДС) во многом зависит от того, какой алгоритм используется при расчете коэффициентов распределения  $k_{Dv}$  по гармоникам произ-

вольных порядков  $v$ . Однако до настоящего времени обобщенного выражения, подобного (1), для обмоток множества  $W_{dmkz}$  не создано.

Попытка решить эту задачу аналитически была предпринята еще Р. Рихтером [1]. В результате были предложены два расчетных выражения, позволяющие рассчитывать коэффициенты  $k_{Dv}$  в зависимости от четности или нечетности знаменателя дробности. Однако ни полученные Р. Рихтером результаты, ни указанный аналитический подход в последующем должного развития и практического применения не получили.

Так, в одной из самых авторитетных современных монографий по теории обмоток вопросам методики расчета коэффициента  $k_{Dv}$ , посвящено более 30 страниц текста [3, подразделы 5.4-5.7]. Указанная методика характеризуется повышенной трудоемкостью, т.к. требует построения полярных векторных диаграмм МДС (ЭДС) дробных обмоток по каждой из анализируемых гармоник. Свообразным признаком повышенной трудоемкости указанного подхода являются и таблицы величин коэффициентов  $k_{Dv}$ , приведенные в приложении 15 и содержащие данные значения только для рабочих гармоник и для гармоник низшего порядка.

Конечно же, саму идею создания табличного банка данных, неполного и по содержанию, и по области применения трудно признать соответствующей уровню современных требований, а содержание таблиц не обеспечивает полноту гармонического анализа.

Задачей настоящей статьи является анализ причин создавшейся ситуации и разработка обобщенных методов расчета коэффициентов  $k_{Dv}$ , классических дробных обмоток  $W_{1mkz}$  и обеспечивающих их универсальность и простоту программной реализации.

Для решения указанной задачи следует использовать способ построения симметричных дробных обмоток, предложенный Р. Рихтером. Способ основан на формировании числовых последовательностей  $P_Q$  номеров пазов, в которых размещены АКС одной из фаз. Последовательность  $P_Q$  представляет собой арифметическую прогрессию, выполненную с шагом  $R$

$$R = \frac{mQn \pm 1}{d}, \quad (2)$$

где  $n$  – такое натуральное число, при котором  $R$  – целое число.

Это обеспечивает смещение соответствующих указанным АКС векторов на диаграммах МДС (ЭДС) в масштабе рабочих гармоник ( $p=d$ ) на угол  $\alpha_z$  минимального сдвига в магнитном поле и, следовательно, максимально возможное значение коэффициента  $k_{Dp}$ .

Указанный подход может использоваться как для построения дробных обмоток, так и для исследования их свойств. Как способ формирования дробных обмоток он широко распространения не получил, т. к. по трудоемкости значительно уступает способу [2], основанному на построении числового ряда обмотки и отличающегося простотой и эффективностью.

Но при анализе свойств обмоток идея Р. Рихтера может быть использована очень продуктивно по следующим причинам. Во-первых, последовательности  $P_Q$  определяют положение минимального числа ( $Q$ ) полярных векторов, позволяющих определить коэффициент  $k_{Dv}$  на диаграммах в масштабе гармоник произвольных порядков. Во-вторых, на любой из этих диаграмм угловое смещение каждого вектора относительно соседнего одинаково.

Именно такой подход был применен автором при выводе формул расчета коэффициентов распределения дробных обмоток  $k_{Dv}$ , хотя единого выражения так и не было получено. Одной из главных причин этого является выбор в качестве объекта исследования **периода** [4]. Достаточно распространенными аналогами этого понятия являются **элементарная обмотка** [3] и **повторяющаяся часть** обмотки [2].

Применительно к параметрам объединенного множества  $W_{dmkz}$  определим **период как обмотку с заданным числом пазов на полюс и фазу  $q$ , выполненную в минимальном числе пазов.**

Однако в дробных  $2m$ -зонных обмотках с четными и нечетными знаменателями дробности  $d$  при одном и том же значении  $Q$  периоды различны.

При этом они отличаются, как размером (периоды таких обмоток при четных  $d$  занимают вдвое меньшее число пазов), так и плотностью гармонического спектра. Действительно, если на периоде  $2m$ -зонных обмоток с четными знаменателями  $d$  порядки  $v$  ненулевых гармоник ЭДС определяются выражением

$$v=1, 2, 3, 4, \dots,$$

т.е. содержат как четные, так и нечетные гармоники, то при нечетных знаменателях  $d$  отсутствуют все гармоники четных порядков

$$v=1, 3, 5, 7, \dots$$

Очевидно, что в этих условиях обобщенное выражение расчета коэффициентов распределения  $k_{Dv}$  и не могло быть получено.

Выходом из создавшейся ситуации может послужить выбор новой базы для поиска необходимой обобщенной формулы.

Такой базой, **обушей** в пределах объединенного множества  $W_{dmkz}$  многофазных дробных обмоток, может служить **основная обмотка**, под которой **условимся понимать обмотку, число полюсов  $p$  которой равно знаменателю дробности  $d$ , выполненную в минимальном числе пазов  $Z_0=k_z m Q$ .**

Кроме того, следует внести ясность в сущность и порядок применения понятий: абсолютный  $v'$  и относительный  $v$  порядки гармоник.

Понятие **относительного**  $v$  порядка введено в практику при переходе от периода обмоток множества  $W_{dmkz}$  к многополюсным их модификациям, образованным повторением **периода**  $T$  раз [4, 5]. Поскольку периоды указанных обмоток всегда двухполюсные ( $p=1$ ), то число пар полюсов оказывается равным числу повторений:  $p=T$ . Смысл этого понятия заключается в том, что оно используется в качестве **расчетного значения** в выражении (1). Поэтому результаты, получен-

ные в процессе исследования свойств обмоток на периоде, справедливы и для обмотки, состоящей из  $p$  повторяющихся периодов. Это позволяет любые характеристики, полученные на периоде обмотки, использовать применительно к многополюсной обмотке. Например, при переходе к  $p$ -полюсной обмотке достаточно только учесть, что значения коэффициентов  $k_{Dv}$  по (1) соответствуют уже **абсолютным** порядкам  $v'$ , определяемым по выражению

$$v'=vp=vT.$$

Таким образом, для обмоток множества  $W_{dmkz}$  относительный порядок гармоник адекватно определяется как по значению рабочей гармоники  $v=p$ , так и по числу повторений  $T$  периодов

$$v=v'/p=v'/T.$$

Но уже в случае дробных обмоток числа периодов  $T$  и полюсов  $p=d$  обмотки не совпадают. Тем не менее, широкое распространение получила практика определения относительных порядков дробных обмоток по формуле

$$v=v'/p.$$

В этом случае некоторые из относительных порядков  $v$  выражаются дробными числами. Дробные порядки не только противоречат самому смыслу понятия гармонических составляющих, но и не могут быть эффективно использованы в качестве расчетных значений при определении обмоточных коэффициентов и их составляющих. В силу этого, понятие дробных порядков целесообразно вообще исключить из рассмотрения.

Условимся под **относительным порядком  $v$  гармоник** всюду далее понимать **абсолютные порядки основных обмоток**, а для производных обмоток, получаемых повторением основных, определять эти значения по выражению

$$v=v'/T,$$

где  $T$  – число повторений основной обмотки.

Заметим, что при четных знаменателях  $d$  производные  $2m$ -зонные ( $k_z=2$ ) обмотки могут быть выполнены в нечетном числе пазов  $Z$ . В этом случае число повторений  $T$  будет выражаться дробным числом со знаменателем  $d=2$ . Но опасаться этого не следует, поскольку основная обмотка в этом случае содержит в своем спектре только гармоники четных порядков, то абсолютные порядки  $v'$  гармоник таких обмоток всегда будут выражаться в виде целых чисел.

Прежде чем перейти к выводу обобщенного выражения расчета  $k_{Dv}$ , в пределах основных обмоток, необходимо скорректировать исходное выражение (2).

Дело в том, что рядом  $P_Q$   $2m$ -зонных дробных обмоток с нечетными  $d$ , полученным по (2), могут соответствовать чередования как согласно (при четных значениях  $n$ ), так и встречно (при нечетных  $n$ ) включаемых АКС. В таких же обмотках при четных знаменателях  $d$  шаг  $R$  может быть целым числом только при нечетных  $n$ . Для  $m$ -фазных обмоток последовательность  $P_Q$  отображает распределение только согласно включаемых АКС.

С учетом этих особенностей и того обстоятельства, что знаки плюс или минус в (2) указывают просто направление отсчета углов, условимся далее использовать указанное выражение в виде

$$R = \frac{mQn_1 - 1}{d}, \quad (2')$$

где  $n_1$  – такое **нечетное** натуральное число, при котором  $R$  – целое число.

Тогда на векторной диаграмме в масштабе произвольной  $v$ -ой гармоники угол сдвига  $\Theta_{\Delta k}$  между единичными векторами, соответствующими соседним АКС, составит

$$\Theta_v = \alpha_v R + \frac{2\pi}{k_z} = \alpha_z R v + \frac{2\pi}{k_z} = \frac{2\pi v}{k_z m Q} + \frac{2\pi}{k_z}.$$

Это позволяет получить обобщенное выражение расчета коэффициента  $k_{Dv0}$  дробных обмоток одним из двух известных способов. В простейшем случае вывод осуществляется заменой угла  $\alpha_v = 2\pi v / (mk_z Q)$  в известной формуле (1) для обмоток с целым числом пазов на полюс и фазу значением  $\Theta_v$

$$k_{Dv} = \frac{\sin\left(\frac{\pi v}{mk_z}\right)}{Q \sin\left(\frac{\pi v}{mk_z Q}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi v R}{mk_z} + \frac{\pi Q}{k_z}\right)}{Q \sin\left(\frac{\pi v R}{mk_z Q} + \frac{\pi}{k_z}\right)}. \quad (3)$$

Полученное таким образом выражение в большинстве случаев вполне применимо на практике, если задачей гармонического анализа является определение абсолютных значений коэффициентов распределения  $k_{Dv0}$ . Однако, в некоторых случаях, пренебрежение знаками этого коэффициента может привести к неверным результатам. Так, использование (3) недопустимо, например, при определении формы выходного напряжения на выходе генератора, т. к. изменению знака при  $k_{Dv0}$  приводит к изменению фазы соответствующей гармоники  $v_0$  на взаимно инверсную.

Второй способ заключается в том, что полярные векторы МДС (ЭДС) одной из фаз на диаграмме в масштабе гармоники порядка  $v_0$  располагаются симметрично относительно оси, что позволяет определить результат их геометрического сложения, как сумму проекций указанных векторов на эту ось. В этом случае изменения направления результирующего вектора автоматически вызывает смену знака при искомом коэффициенте  $k_{Dv0}$ .

Опуская здесь вывод формулы этим способом, отметим, что полученный результат будет отличаться от (3) дополнительным множителем  $M_{v0}$ , принимающим значения "+1", "-1" и "0" и выполняющим роль корректора знака

$$M_v = \cos\left[\frac{\pi(Q-1)}{k_z}(1-v)\right].$$

Следует отметить, что формулы (1) и (3) приводят к ненулевым значениям коэффициентов  $k_{Dv}$  при любых целых порядках гармонических. Поэтому, в строгом смысле, они справедливы только в отношении  $m$ -зонных основных обмоток, т. к. в спектрах гармонических МДС (ЭДС) таких обмоток содержатся как четные, так и нечетные гармоники

$$v_0 = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$$

Порядки бесконечного ряда гармоник подразделим на диапазоны

$$1 + k_z m Q \cdot (n_2 - 1) \leq v \leq k_z m Q \cdot n_2,$$

где  $n_2 = 1, 2, 3, 4, \dots$  – порядок диапазона.

Максимальное число  $N_Z$  гармоник, которым соответствуют ненулевые значения коэффициентов  $k_{Dv0}$ , в пределах любого диапазона определяется по выражению

$$2N_Z = 2mQ / k_z.$$

На практике задача гармонического анализа обмоток сводится к определению  $N_Z$  коэффициентов  $k_{Dv0}$

в половине первого диапазона, т. к. для любых других порядков используется свойство периодичности обмоточных коэффициентов.

При нечетных значениях  $Q$  закон периодичности предстает в виде (здесь и далее  $v_0$  – порядок гармоники первого диапазона основной обмотки)

$$k_{D(k_z m Q \cdot n_2 \pm v_0)} = k_{Dv_0}, \quad (4)$$

а при четных  $Q$

$$k_{D(2k_z m Q \cdot n_2 \pm v_0)} = k_{Dv_0}. \quad (5)$$

Для абсолютных значений  $k_{Dv}$  правило периодичности имеет вид

$$\left|k_{D(k_z m Q \cdot n_2 \pm v_0)}\right| = \left|k_{Dv_0}\right|.$$

Особенности закона периодичности коэффициентов распределения в зависимости от четности или нечетности числа  $Q$  наглядно иллюстрируются графиками зависимостей  $k_{Dv0} = f(v_0)$ , приведенными на рис. 1.

На рис. 1,а приведен график типичной зависимости  $k_{Dv} = f(v_0)$  для обмоток с нечетными значениями  $Q$ , характеризующийся сохранением значений и знаков коэффициентов  $k_{Dv}$  относительно плоскости зеркальной симметрии  $mm$  в соответствие с (4).

При четных значениях  $Q$ , как это следует из рис. 2,б типичная зависимость  $k_{Dv} = f(v_0)$  характеризуется наличием центра симметрии  $C$ , располагающегося на горизонтальной оси по середине каждого диапазона и вызывающих инверсию знаков коэффициентов  $k_{Dv}$ . Здесь плоскость зеркальной симметрии  $mm$  кривой  $k_{Dv} = f(v_0)$  возникает только на границах диапазонов, что объясняет появление множителя 2 в индексе формулы (5).

Для автоматического обнуления отсутствующих гармоник  $2m$ -зонных обмоток в формулы (1) и (3) следует ввести добавочные множители  $M_1$  и  $M_3$  соответственно:

$$M_1 = \left| \sin\left[\frac{\pi v_0}{2}\right] \right|,$$

$$M_3 = \left| \sin\left[\frac{\pi(v_0 + d + 1)}{2}\right] \right|.$$

Тогда получим:

$$k_{Dv} = \frac{\sin\left(\frac{\pi v}{mk_z}\right) \cdot M_1}{q \sin\left(\frac{\pi v}{mk_z q}\right)}, \quad (1)$$

$$k_{Dv} = \frac{\sin\left(\frac{\pi v_0 R}{mk_z} + \frac{\pi Q}{k_z}\right) \cdot M_{v_0} \cdot M_1 \cdot M_3}{Q \sin\left(\frac{\pi v_0 R}{mk_z Q} + \frac{\pi}{k_z}\right)}. \quad (3')$$

Сочетание формул (2', 3', 4,5) составляет основу первого алгоритма гармонического анализа обмоток объединенного множества  $W_{dmkz}$ .

Второй алгоритм может быть получен с использованием известного свойства [6-8] обмоток объединенного множества  $W_{dmkz}$ . Это свойство заключается в том, что при фиксированном значении числа пазов на полюс и фазу  $Q$  и произвольном значении знаменателя  $d$  набор из  $N_Z$  коэффициентов  $k_{Dv0}$  остается неизменным, но распределение указанных коэффициентов при каждом значении осуществляется по гармоникам различных порядков.

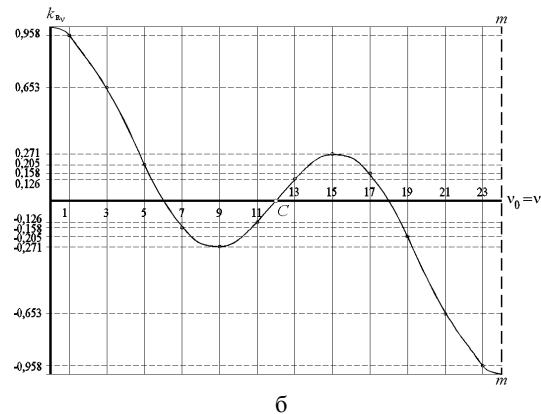
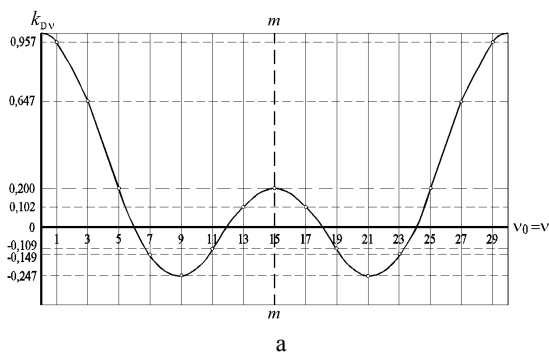


Рис. 1. Типичные зависимости  $k_{Dv}=f(v_0)$  для обмоток с нечетными (а,  $q=5$ ) и четными (б,  $q=4$ ) значениями  $Q=q$

Задача определения закона перераспределения значений коэффициентов  $k_{Dv}$  по гармоникам различных порядков  $v_0$  в зависимости от знаменателя дроби  $d$  решается следующим образом.

На основании сопоставительного анализа расчетов по выражениям (1') и (3') установлено, что формула (1') адекватно применима к основным дробным обмоткам, если порядки  $v$  гармоник в ней заменить **расчетным порядком  $v_p$** , определяемого по выражению

$$v_p = v' / p = v / d$$

при условии, что указанное отношение является **целым числом** в случае  $m$ -зонных обмоток и – **целым нечетным числом** в случае  $2m$ -зонных обмоток.

Если для основных обмоток с целым  $q$  число  $2N_z$  гармоник, удовлетворяющих этому условию, обеспечивается уже в пределах первого диапазона гармонического спектра, то для произвольных основных дробных обмоток указанное число расчетных гармоник  $v_p$  содержится не менее чем в  $d$  диапазонах.

При этом оказывается, что графики зависимостей коэффициентов  $k_{Dv}$  от расчетных значений  $v_p$  полностью идентичны кривым на рис. 2 при условии сохранения числа пазов на фазную зону  $Q$ .

Проиллюстрируем это свойство графиками зависимостей  $k_{Dv}=f(v_p)$  и  $k_{Dv}=f(v_0)$  для основной  $2m$ -зонной дробной обмотки с нечетным числом  $Q$  ( $q=5/4$ ), приведенными на рис. 3.

Как следует из рисунка, полученная кривая  $k_{Dv}=f(v_p)$  располагается в четырех ( $d=4$ ) диапазонах и в точности повторяет аналогичную зависимость  $k_{Dv}=f(v)$  на рис.1,а относительно расчетных значений  $v_p=v/d$  нижней шкалы. Но каждому значению  $k_{Dv}$  по гармонике  $v_p$  любого из старших диапазонов может быть поставлено в соответствие с зеркальным характером периодичности (4) равное значение коэффициента  $k_{Dv,0}$  по гармонике  $v_0$  из первого диапазона. Указанное соответствие можно интерпретировать как параллельный перенос участков кривой

$k_{Dv}=f(v_p)$  старших диапазонов в зону первого диапазона так, как это показано на рис. 3.

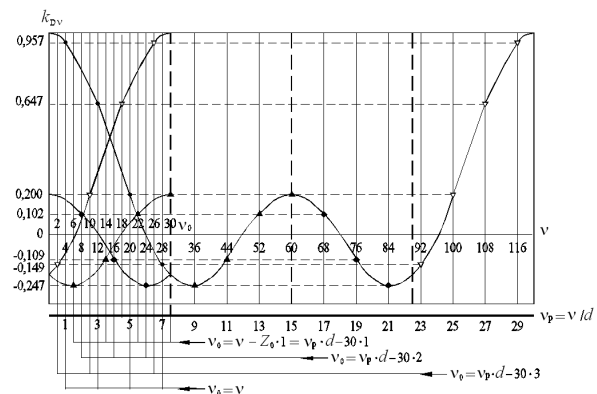


Рис. 2. Зависимости  $k_{Dv}=f(v_p)$  и  $k_{Dv}=f(v_0)$  основной дробной обмотки ( $q=5/4$ )

Для обмоток с четными значениями числа периодичность коэффициентов  $k_{Dv}$  носит инверсный характер. Поэтому механическое (без учета указанной особенности) повторение преобразований, выполненных на рис. 2, может привести к неверным результатам. Порядковые номера диапазонов на данном рисунке обозначены римскими цифрами.

Пример некорректного преобразования приведен на рис. 3,а. Ошибка заключается в том, что перенос участков кривой  $k_{Dv}=f(v_p)$  выполнен из первых пяти диапазонов, в то время, как допустим такой перенос только из **нечетных диапазонов**.

Корректное преобразование выполнено на рис. 3,б. Здесь выполнен перенос участков кривой  $k_{Dv}=f(v)$  только каждого **нечетного диапазона**, начиная с третьего, в зону первого из них, что соответствует требованию (4). (Четные диапазоны исключены.) В результате получаем результирующий график зависимости  $k_{Dv}=f(v_0)$ .

Сопоставление графиков первых диапазонов рис. 3 наглядно показывает, что их отличие проявляется только в тех участках кривых  $k_{Dv}=f(v_0)$ , которые на рис. 3,а получены переносом из четных диапазонов, и заключается в инверсии знаков некоторых коэффициентов  $k_{Dv}$ .

В аналитическом виде условие равенства коэффициентов  $k_{Dv}$  описывается выражением

$$v = v_p \cdot d = 2k_z m Q n_3 + v_0, \quad (6)$$

откуда следует

$$v_p = \frac{2k_z m Q n_3 + v_0}{d}, \quad (7)$$

где  $n_3$  – наименьшее натуральное число, при котором для  **$2m$ -зонных обмоток** – **целое нечетное число**, а в случае  **$m$ -зонных обмоток**  $v_p$  – **любое целое число**.

Совокупность формул (7, 1', 4, 5) составляет основу второго алгоритма расчета коэффициентов распределения  $k_{Dv}$  произвольных обмоток множества  $W_{dmkz}$ , обеспечивающего простоту реализации и минимальные затраты времени

Представленный материал позволяет представить множество  $W_{dmkz}$  в виде совокупности гомологических рядов, построенных на базе двухполюсных обмоток-оснований, структура которых изменяется по определенному закону – алгоритму формирования дробных обмоток с фиксированными целыми числами пазов на полюс и фазу  $q=Q$ .



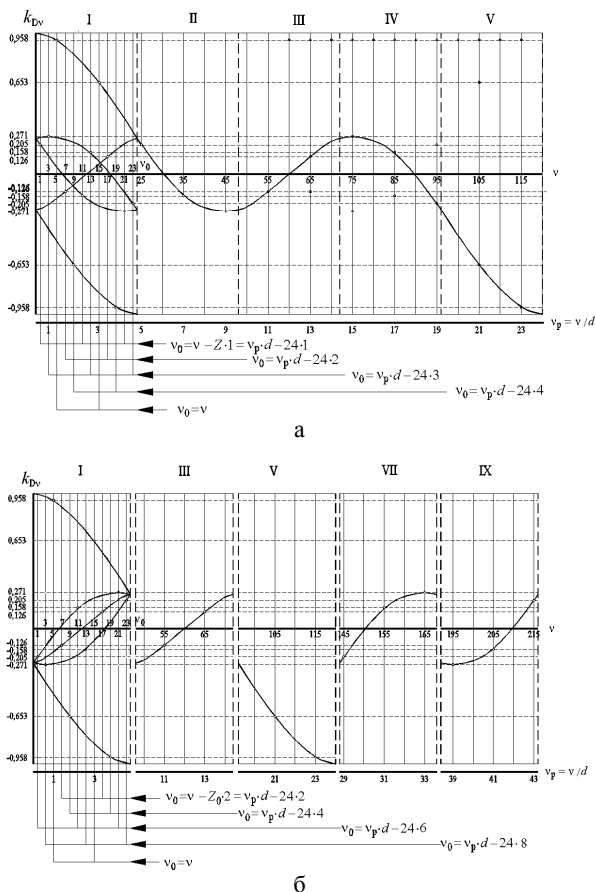


Рис. 3. Зависимости  $k_{Dv}=(v_p)$  и  $k_{Dv}=f(v_0)$  основной дробной обмотки ( $q=4/5$ )

Во многом характер гомологических связей подобен их проявлению в других множествах объектов. Например, в гомологических рядах химических соединений основные химические и физические свойства определяются функциональными группами, а степень их проявления – углеродным скелетом. Как правило, по мере увеличения числа атомов углерода свойства соединений увеличиваются или уменьшаются с определенной закономерностью. Однако в ряде случаев указанные закономерности не соблюдаются.

В нашем случае электромагнитные свойства дробных обмоток (совокупность пар: порядок гармоники  $v$ ; величина коэффициента распределения  $k_{Dv}$ ) закономерно изменяются по мере увеличения знаменателя дроби  $d$ . Степень проявления этих свойств (количество  $N_z$  коэффициентов на диапазон и уровень значения коэффициентов  $k_{Dv}$ ) определяется числом пазов на фазную зону  $Q$ .

Отличительной чертой гомологии обмоток множества  $W_{dmkz}$  является тот факт, что закономерность изменения электромагнитных свойств по мере перехода от обмотки-основания к произвольным обмоткам гомологического ряда однозначно определяется аналитически – формулой (7).

С большой долей вероятности можно предположить, что проявление гомологии при переходе от двухполюсных обмоток к многополюсным упорядоченным преобразованием их структуры является фундаментальным свойством произвольных многофазных обмоток. Если полагать, что в полном множестве  $W_m$  многофазных обмоток существуют типы двухполюс-

ных обмоток, отличающихся от обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу, то в пределах этого множества может быть сформировано бесконечное число гомологических рядов многополюсных обмоток, построенных на базе других типов основных двухполюсных обмоток-оснований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рихтер Р. Обмотки якорей машин переменного и постоянного токов. – М.: ОНТИ, 1933. – 364 с.
2. Лившиц-Гарик М. Обмотки машин переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 766 с.
3. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин переменного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 400 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Т.1. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 652 с.
5. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для вузов. – СПб: Питер, 2008. – 350 с.
6. Сорокер Т.Г., Мордвинов Ю.В. Составление схем и расчет обмоточных коэффициентов симметричных петлевых обмоток многофазного переменного тока // Вестник электропромышленности. – 1955. – № 2. – С. 16-21.
7. Захаров М.К. О некоторых особенностях пространственного распределения магнитодвижущих сил симметричных обмоток переменного тока // Научные записки Одесского политехнического института. – Т.25. – 1960. – С. 38-47.
8. Дегтев В.Г., Радимов И.Н. Анализ намагничивающих сил обмоток переменного тока // Респ. межвед. науч.-техн. сб. "Электромашиностроение и электрооборудование". – Киев: Техника, 1975. – №20. – С.122-128.

**Bibliography (transliterated):** 1. Rihter R. Obmotki yakorej mashin peremennogo i postoyannogo tokov. - M.: ONTI, 1933. - 364 s. 2. Livshic-Garik M. Obmotki mashin peremennogo toka. - M.: Gos'energoizdat, 1959. - 766 s. 3. Zherve G.K. Obmotki `elektricheskikh mashin peremennogo toka. - L.: `Energoatomizdat, 1989. - 400 s. 4. Ivanov-Smolenskij A.V. `Elektricheskie mashiny. T.1. - M.: Izdatel'skij dom M'EI, 2006. - 652 s. 5. Vol'dek A.I., Popov V.V. `Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka. Uchebnik dlya vuzov. - SPb:Peter, 2008. - 350 s. 6. Soroker T.G., Mordvinov Yu.V. Sostavlenie shem i raschet obmotochnyh ko`efficientov simmetrichnyh petlevykh obmotok mnogofaznogo peremennogo toka // Vestnik `elektro-promyshlennosti. - 1955. - № 2. - S. 16-21. 7. Zaharov M.K. O nekotorykh osobennostyah prostranstvennogo raspredeleniya magnitodvizhuschih sil simmetrichnykh obmotok peremennogo toka // Nauchnye zapiski Odesskogo politehnicheskogo instituta. - T.25. - 1960. - S. 38-47. 8. Degtev V.G., Radimov I.N. Analiz namagnichivayuschih sil obmotok peremennogo toka // Resp. mezhved. nauch.-tehn. sb. "Elektromashinostroenie i `elektrooborudovanie". - Kiev: Tehnika, 1975. - №20. - S.122-128.

Поступила 12.12.2012

Дьогтев Володимир Григорійович, д.т.н., проф.,  
Одеський національний політехнічний університет  
65058, Одеса, пр. Шевченка, 1  
(063)9779569  
e-mail:kem.deg@gmail.ru

Degtev W.G.

#### Fractional windings harmonic analysis.

Investigation results for multiphase windings of a united variety that includes windings with fractional and integer number of slots per pole and phase are given. An algorithm of the specified windings distribution coefficients calculation by random orders harmonics is introduced. An analytic ratio of the windings harmonic composition correspondence allowing representing the structure of the united variety as a set of homologous chains is determined.

**Key words – fractional windings, distribution factor, winding factor, homologous chains, symmetric components method, universal algorithm.**

## ОСОБЕННОСТИ РАСПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ

*Досліджено залежності швидкості розплавлення металу електроду при дуговому зварюванні від зварювального струму. Розглянуто випадки зварювального процесу без випаровування металу електроду, з випаровування металу електроду та з попереднім нагріванням електроду. Встановлено, що використання лінійної апроксимації залежностей швидкості розплавлення металу електроду від струму більш перспективне, ніж використання пропорційної апроксимації, оскільки лінійна більш точна у всьому діапазоні зварювальних струмів.*

*Исследованы зависимости скорости расплавления металла электрода при дуговой сварке от сварочного тока. Рассмотрены случаи сварочного процесса без испарения металла электрода, с испарением металла электрода и с предварительным нагревом электрода. Определено, что использование линейной аппроксимации зависимостей скорости расплавления металла электрода от тока перспективнее, чем использование пропорциональной аппроксимации, т.к. линейная более точная во всем диапазоне сварочных токов.*

### ВВЕДЕНИЕ

Скорость плавления электрода существенно влияет на производительность процесса дуговой сварки, и определяет его энергетическую и экономическую эффективность. Исследование зависимости скорости плавления от различных параметров процесса является актуальным, особенно в настоящее время, когда вопросы ресурсо- и энергосбережения вышли на первый план.

Скорость плавления металла электрода зависит от многих факторов (состава электрода и покрытия, флюса, защитного газа, величины сварочного тока, его вида и полярности, длины вылета и диаметра электрода и др.). Исторически сложилось так, что аппроксимация экспериментальных зависимостей массовой скорости плавления  $G_{melt}$  (производительности плавления) от тока сварки  $I$  полагалась прямо пропорциональной:

$$G_{melt} = \alpha_{melt} I. \quad (1)$$

Коэффициенту пропорциональности  $\alpha_{melt}$  дали название коэффициента расплавления электрода [1-3]. Накоплено большое количество данных по его экспериментальному измерению. Но эти данные плохо поддаются систематизации, т.к. крайне разрознены. Оказалось, что величина коэффициента расплавления  $\alpha_{melt}$  сама сложным образом зависит от величины сварочного тока  $I$ , его вида и полярности.

В работе [4] получена аппроксимация эмпирической зависимости, которая является линейной

$$G_{melt} = \alpha_{melt} I + G_0. \quad (2)$$

Интуитивно трудно понять наличие в формуле (2) члена, который не зависит от тока, ведь при нуле тока и скорость расплавления нулевая. Но в работе [4] экспериментально доказана адекватность формулы (2). Целью настоящей работы является теоретическое обоснование линейной зависимости скорости расплавления и выявлению границ областей ее применимости.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ ОБЛАСТЕЙ

По современным представлениям с привлечением принципа детального равновесия [5, 6] мощность  $P$ , поступающая от сварочной дуги в каплю, равна:

$$P = U_{eq} I, \quad (3)$$

где  $U_{eq}$  – эквивалентное напряжение при расплавлении дугой [4] имеет различный вид:

$$U_{eq} = U_a + \varphi + \frac{3k_B T_A}{2q_e}, \quad (4)$$

$$U_{eq} = U_k - \varphi - \frac{3k_B T_A}{2q_e}, \quad (5)$$

для сварки на обратной и прямой полярности, соответственно. Здесь  $U_a$  – анодное падение напряжения,  $U_k$  – катодное падение напряжения,  $\varphi$  – работа выхода электрона,  $T_A$  – температура плазмы дуги,  $k_B = 1.38066 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $q_e = 1.6022 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона.

Последний член в правых частях формул (4) и (5) при сварке на обратной полярности учитывает энергию, передаваемую аноду при соударении электрона с анодом, а при сварке на прямой полярности – энергию, которую необходимо затратить для разгона электрона в катодной области до скоростей электронов в плазме.

При расчетах были использованы более простые формулы, не содержащие такого параметра, как температура плазмы дуги

$$U_{eq} = U_a + \varphi + \frac{3}{29} U_i, \quad (6)$$

$$U_{eq} = U_k - \varphi - \frac{3}{29} U_i, \quad (7)$$

где  $U_i$  – потенциал ионизации элемента в составе проволоки (или обмазки) с наименьшим потенциалом ионизации. Подробно такой подход описан в работе [7].

Обычно при обратной полярности  $7,4 \text{ В} \leq U_{eq} \leq 9,2 \text{ В}$ , при сварке на прямой полярности  $7,1 \text{ В} \leq U_{eq} \leq 8,6 \text{ В}$ .

### ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА БЕЗ УЧЕТА ИСПАРЕНИЯ МЕТАЛЛА

В этом случае тепловложение в металл электрода от дуги, которое характеризуется мощностью  $P$ , идет на нагрев металла электрода, поступающего в зону плавления, от температуры электрода  $T_0$  до температуры капли  $T_{drop}$ , и на тепло, затрачиваемое на фазовые переходы. Этот баланс мощностей может быть записан следующим образом:

$$P = U_{eq}I = G_{melt} \left( \int_{T_0}^{T_{drop}} C_p(T) dT + \Sigma\lambda \right), \quad (8)$$

где  $C_p(T)$  – удельная теплоемкость стали,  $\Sigma\lambda$  – сумма удельных теплот фазовых превращений железа.

Из формулы (8) легко найти выражение для скорости расплавления

$$G_{melt} = \frac{U_{eq}I}{\int_{T_0}^{T_{drop}} C_p(T) dT + \Sigma\lambda}. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что скорость расплавления  $G_{melt}$  сильно зависит от температуры капли расплавленного металла.

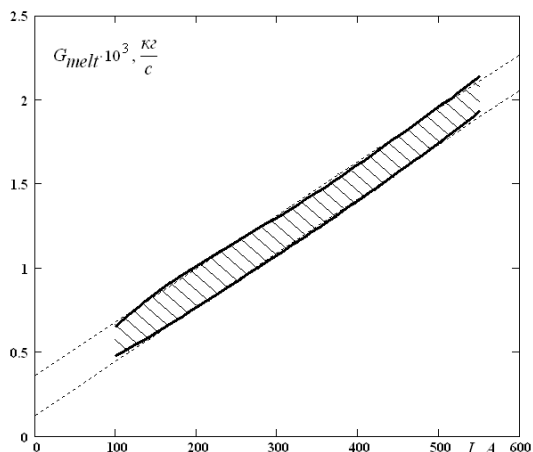


Рис. 1. Область изменения скорости расплавления  $G_{melt}$  для случая, когда испарением с поверхности капли можно пренебречь и подогрев электрода отсутствует (обратная полярность)

Мы будем оперировать со средней температурой капли  $T_{drop}$ , являющейся важным технологическим параметром, влияющим на глубину проплавления сварного шва. Следуя методике предложенной в работе [7] будем полагать, что на границе капли с электродом температура капли близка к температуре плавления металла  $T_{melt}$ , а на границе капли с дугой температура капли близка к температуре кипения  $T_b$  металла электрода, при этом, благодаря интенсивному перемешиванию в середине капли температура выравнивается, и эту температуру мы будем рассматривать как среднюю температуру  $T_{drop}$ , которая в свою очередь зависит от величины сварочного тока.

Подставляя в формулу (9) значения  $U_{eq}$  из выражения (6) для обратной полярности и значения  $T_{drop}$  на верхней и нижней границах зоны обратной полярности [7], получим кривые на рис. 1, ограничивающие область возможных значений  $G_{melt}$  при сварке на обратной полярности и отсутствии испарения с поверхности капли.

Воспользуемся также результатами работы [7] по определению зависимостей средней температуры капли  $T_{drop}$  от сварочного тока.

Подставляя в формулу (9) значения  $U_{eq}$  из выражения (7) для прямой полярности и значения  $T_{drop}$  на верхней и нижней границах зоны обратной полярности [7], получим кривые на рис. 2, ограничивающие область

возможных значений  $G_{melt}$  при сварке на прямой полярности и отсутствии испарения с поверхности капли.

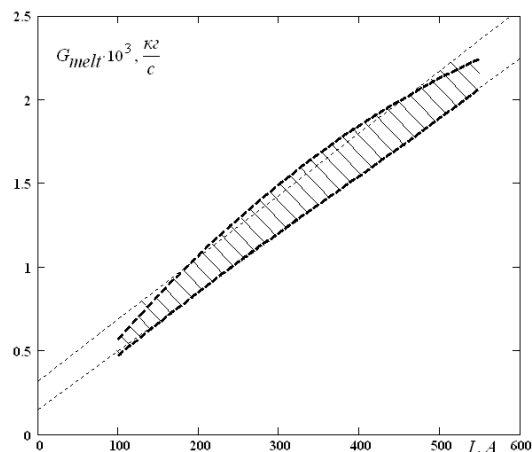


Рис. 2. Область изменения скорости расплавления  $G_{melt}$  для случая, когда испарением с поверхности капли можно пренебречь и подогрев электрода отсутствует (прямая полярность)

Как видно из рис. 1, зависимости скорости расплавления от тока почти идеально описываются линейными зависимостями (2), которые изображены тонкими пунктирными линиями. При этом значения коэффициентов расплавления  $\alpha_{melt}$  для нижней ( $3,22 \cdot 10^{-6}$  кг/(с·А)) и верхней ( $3,18 \cdot 10^{-6}$  кг/(с·А)) границ очень близки. Отличие аппроксимации нижней границы в значении свободного члена  $G_0$ :  $1,24 \cdot 10^{-4}$  кг/с и  $3,60 \cdot 10^{-4}$  кг/с.

Для сварки на прямой полярности (см. рис.2) только нижняя граница хорошо аппроксимируется линейной зависимостью (2). Верхняя граница значительно отклоняется от прямой линии (при малых токах до 20 %).

## ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ МЕТАЛЛА С ПОВЕРХНОСТИ КАПЛИ

Необходимо отметить, что пренебрежение процессами испарения приводит к получению завышенных значений скорости расплавления  $G_{melt}$ .

Поэтому при более уточненном подходе учтем влияние испарения металла с поверхности капли. Так как на практике массовая скорость расплавления  $G_{melt}$  измеряется массой укорочения электрода в единицу времени, то масса испарившегося металла  $G_{ev}$  в единицу времени уже содержится в  $G_{melt}$ . Пусть его доля в расплавленном металле  $G_{melt}$  составляет  $\xi$ . Тогда можно записать  $G_{ev} = \xi \cdot G_{melt}$ , а количество металла, оставшегося в расплавленном состоянии, будет равно  $G_{melt} \cdot (1 - \xi)$ .

Баланс мощностей в этом случае может быть записан следующим образом:

$$U_{eq}I = (1 - \xi) G_{melt} \left( \int_{T_0}^{T_{drop}} C_p(T) dT + \Sigma\lambda \right) + \dots \quad (10)$$

$$\dots + \xi G_{melt} \left( \int_{T_0}^{T_A} C_p(T) dT + \Sigma\lambda + r \right).$$

Здесь выражение в квадратных скобках представляет теплосодержание капель расплавленного

металла при температуре  $T_{drop}$ , а выражение в фигурных скобках представляет некоторое усредненное теплосодержание паров железа ( $r$  – удельная теплота парообразования железа) при температуре плазмы дуги  $T_A$  (пары железа попадают в столб дуги и верхний предел интегрирования в интеграле в фигурных скобках согласно принципа детального равновесия должен быть равен  $T_A$ ).

Из уравнения (10) найдем формулу для определения скорости расплавления  $G_{melt}$  при учете испарения с поверхности капли и отсутствии коротких замыканий

$$G_{melt} = \frac{U_{eq} I}{\left\{ (1-\xi) \left( \int_{T_0}^{T_{drop}} C_p(T) dT + \Sigma\lambda \right) + \dots \right.} \quad (11)$$

$$\left. \dots + \xi \left( \int_{T_0}^{T_A} C_p(T) dT + \Sigma\lambda + r \right) \right\}$$

Величина  $\xi$  согласно исследованиям [8] составляет около 9..10% и не зависит от величины сварочного тока. Вообще величина  $G_{ev}$  по своей сути должна быть обратно пропорциональна скрытой теплоте парообразования и прямо пропорциональна удельной энергии, идущей на расплавление металла [9], поэтому  $\xi$  близко к величине

$$\xi = \frac{G_{ev}}{G_{melt}} = \frac{\int_{T_0}^{T_{drop}} C_p(T) dT + \Sigma\lambda}{\int_{T_0}^{T_A} C_p(T) dT + \Sigma\lambda + r} \quad (12)$$

Например, при  $T_b = 1808$  К,  $T_0 = 293$  К и  $T_A = 6266$  К, доля  $\xi$ , определенная по формуле (12), будет равна  $\xi = 10\%$ . Эта формула проще и существенно отличается от подобной формулы, предложенной в работе [9].

В случае отсутствия подогрева электрода, подставляя в формулу (11)  $T_0 = 293$  К,  $\xi = 10\%$  и значения  $U_{eq}$  из выражений (6) для обратной полярности и значения  $T_{drop}$  на верхней и нижней границах зоны обратной полярности [7], получим кривые на рис. 3, ограничивающие область возможных значений  $G_{melt}$  при сварке на обратной полярности при учете испарения с поверхности капли. Аналогично, получим кривые на рис. 4, ограничивающие область возможных значений  $G_{melt}$  при сварке на прямой полярности при учете испарения с поверхности капли при отсутствии подогрева электрода.

Сравнение кривых на рис. 3 и 4, полученных с учетом испарения металла, с кривыми на рис. 1 и 2, полученных при отсутствии испарения металла, показывает, что скорость расплавления  $G_{melt}$  при учете испарения с поверхности капли уменьшается в 1,4..1,8 раза. Поэтому можно сделать вывод, что учет влияния испарения обязателен.

Хотя величина  $\xi$  невелика, второе слагаемое в знаменателе выражения (11) сравнимо по величине с первым слагаемым из-за большой величины теплосодержания паров железа, что, собственно, и обуславливает существенное снижение скорости расплавления  $G_{melt}$  при учете испарения металла с поверхности капли.

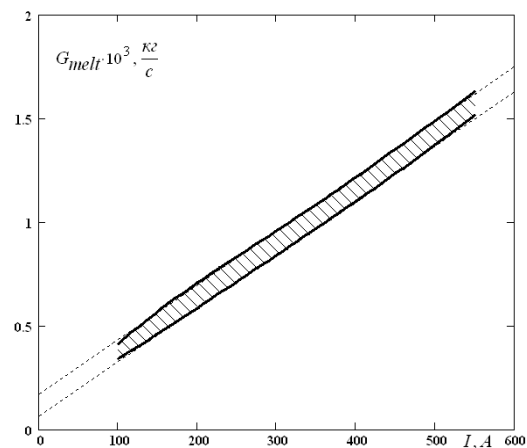


Рис. 3. Область изменения скорости расплавления  $G_{melt}$  при учете испарения с поверхности капли и отсутствии подогрева электрода (обратная полярность)

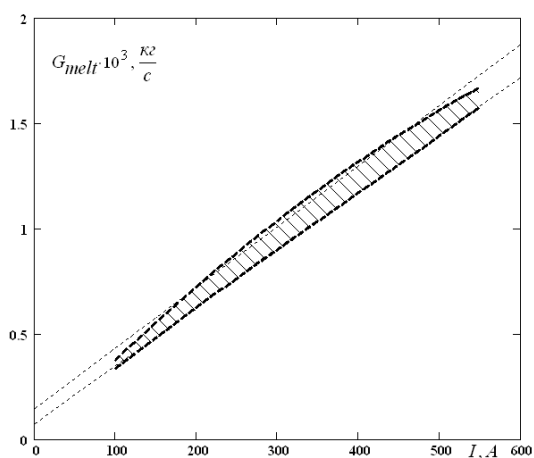


Рис. 4. Область изменения скорости расплавления  $G_{melt}$  при учете испарения с поверхности капли и отсутствии подогрева электрода (прямая полярность)

Несмотря на различия скоростей расплавления с учетом испарения и без такового, характер кривых почти не изменяется: они достаточно хорошо аппроксимируются линейной функцией (2).

#### ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА С УЧЕТОМ ЕГО ПОДОГРЕВА

Отметим, что температура электрода, близкая к  $T_0 = 293$  К, наблюдается при подводной сварке, а также в начале сварки штучным электродом при ручной дуговой сварке. В конце сварки штучным электродом на воздухе, также при механизированной сварке, особенно с длинным вылетом, электрод может подогреваться на  $400^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 693$  К). При этом уравнение (12) дает  $\xi = 8,5\%$  и, пересчитывая формулу (11) при этих новых значениях  $T_0$  и  $\xi$ , получим зависимости для  $G_{melt}$  от тока.

Графики зависимостей приводить не будем, но отметим следующее. Несмотря то, что скорости расплавления с учетом предварительного подогрева больше, чем без подогрева, характер кривых не изменяется: они достаточно хорошо аппроксимируются линейной функцией (2).

## ВЫВОДЫ

1. Использование пропорционального закона для аппроксимаций зависимостей скорости расплавления металла электрода при дуговой сварке нерационально, т.к. коэффициент пропорциональности (так называемый коэффициент расплавления электрода) сложным образом зависит от тока сварки и других параметров сварочного процесса.

2. Использование линейного закона для аппроксимаций зависимостей скорости расплавления металла электрода при дуговой сварке оправдано тем, что он дает высокую точность во всем диапазоне сварочных токов и для различных случаев протекания сварочного процесса: без испарения металла электрода, с испарением, а также с предварительным подогревом электрода.

3. Высокая точность линейной аппроксимации зависимостей скорости расплавления металла электрода дает возможность решать задачи энерго- и ресурсосбережения для процесса дуговой сварки.

## ПОДДЕРЖКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научные исследования, результаты которых изложены выше, проведены при финансовой поддержке "Государственного фонда фундаментальных исследований Украины" в рамках совместного украинско-российского проекта ДФФД-РФФИ-2011 (грант Ф40.7/047).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы сварки / [В.В. Фролов, В.А. Винокуров, В.Н. Волченко и др.] - М.: Высш. шк., 1970. - 592 с.
2. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. - М.: Машиностроение, 1970. - 335 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад. Б.Е. Патона. - М.: Машиностроение, 1974. - 768 с.
4. Варуха Е.Н. Расчет скорости плавления предварительно нагретого электрода при сварке в углекислом газе // Сварочное производство. - 2012. - № 2. - С. 3-8.
5. Nakamura T. Wire Melting Behavior by Non-Steady Heat Conduction Numerical Analysis in Gas Metal Arc Welding. Development of Ultra-Narrow Gap GMA Welding Process. Report 2. / T. Nakamura, K. Hiraoka // Quarterly Journal of the Japan Welding Society. - 2002. - Vol.20, No.1. - P. 53-62.
6. Ленивкин В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров - М.: Машиностроение, 1989. - 264 с.
7. И.В. Пентегов Аналитическое определение коэффициента расплавления электрода при дуговой сварке сталей / И.В. Пентегов, В.Н. Сидоренко, О.И. Петриенко, А.М. Жерносеков // Вестник Черниговского Государственного Технологического ун-та. - 2012. - №2 (57). - С. 89-96.
8. Петров А.В. Перенос металла в дуге при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов / А.В. Петров // Автоматическая сварка. - 1955. - №2. - С. 26-33.
9. Дятлов В.И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке [Новые проблемы сварочной техники (сборник статей)]. - Киев: Техника, 1964. - С. 167-182.

**Bibliography (transliterated):** 1. Teoreticheskie osnovy svarki / [V.V. Frolov, V.A. Vinokurov, V.N. Volchenko i dr.] - M.: Vyssh. shk., 1970. - 592 s. 2. Leskov G.I. `Elektricheskaya svarochnaya duga. - M.: Mashinostroenie, 1970. - 335 s. 3. Tehnologiya `elektricheskoy svarki metallov i splavov plavleniem. Pod red. akad. B.E. Patona. - M.: Mashinostroenie, 1974. - 768 s. 4. Varuha E.N. Raschet skorosti plavljeniya predvaritel'no nagretogo `elektroda pri svarke v uglekisloe gaze // Svarochnoe proizvodstvo. - 2012. - № 2. - S. 3-8. 5. Nakamura T. Wire Melting Behavior by Non-Steady Heat Conduction Numerical Analysis in Gas Metal Arc Welding. Development of Ultra-Narrow Gap GMA Welding Process. Report 2. / T. Nakamura, K. Hiraoka // Quarterly Journal of the Japan Welding Society. - 2002. - Vol.20, No.1. - P. 53-62. 6. Lenivkin V.A. Tehnologicheskie svojstva svarochnoj dugi v zaschitnyh gazah / V.A. Lenivkin, N.G. Dyurgerov, H.N. Sagirov - M.: Mashinostroenie, 1989. - 264 s. 7. I.V. Pentegov Analiticheskoe opredelenie ko`efficianta rasplavljeniya `elektroda pri dugovoj svarke stalej / I.V. Pentegov, V.N. Sidorec, O.I. Petrienko, A.M. Zhernosekov // Vestnik Chernigovskogo Gosudarstvennogo Tehnologicheskogo un-ta. - 2012. - №2 (57). - S. 89-96. 8. Petrov A.V. Perenos metalla v duge pri svarke pлавящимся `elektrodom v srede zaschitnyh gazov / A.V. Petrov // Avtomaticheskaya svarka. - 1955. - №2. - S. 26-33. 9. Dyatlov V.I. `Elementy teorii perenosa `elektrodnogo metalla pri `elektrodugovoj svarke [Novye problemy svarochnoj tehniki (sbornik statej)]. - Kiev: Tehnika, 1964. -S. 167-182.

Поступила 20.09.2012

*Сидоренко Владимир Николаевич, д.т.н., с.н.с., в.н.с.*  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
отдел физики газового разряда и техники плазмы.  
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11  
тел. (044) 205-23-47, e-mail: sidvn@ua.fm

*Жерносеков Анатолий Максимович, к.т.н., с.н.с.*  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
отдел источников питания  
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11  
тел. (044) 200-44-78, e-mail: maximan23@i.ua

*Пентегов Игорь Владимирович, д.т.н., проф., в.н.с.*  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
отдел электротермии  
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11  
тел. (044) 206-13-88, e-mail: magn@i.com.ua

*Петриенко Ольга Игоревна, к.т.н.*  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
отдел электротермии  
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11  
тел. (044) 205-21-80, e-mail: svpustovoit@gmail.com

*Sydorets V.M., Zhernosekov A.M., Pentegov I.V., Petrienko O.I.*

### **Features of electrode melting in arc welding of steels.**

Dependences of electrode metal melting rate upon welding current under arc welding have been investigated. Cases of the welding process with and without the electrode metal evaporation and with the electrode preliminary heating have been considered. It is determined that application of linear approximation of the electrode metal melting rate versus welding current is more efficient, as compared with proportional approximation, since it is more accurate within the entire range of welding currents.

**Key words – arc welding, welding current, electrode metal melting, approximation.**

## РІВНЯННЯ НЕСИМЕТРИЇ ВУЗЛА ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ ПРИ ФАЗНОМУ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ

*Запропоновано формулу обчислення напруги вузла живлення електричних моторів від спільного трансформатора в разі короткого замикання фази одного з моторів. Формула призначена для використання на кожному часовому кроці інтегрування рівнянь стану електромеханічної системи.*

*Предложено формулу вычисления напряжения узла питания электрических двигателей от общего трансформатора в случае короткого замыкания фазы одного из двигателей. Формула предназначена для использования на каждом временном шаге интегрирования уравнений состояния электромеханической системы.*

### ВСТУП

Переважає кількість наукових праць з аналізу електромеханічних систем, присвячена аналізу їхніх симетричних станів. У [1] нами змодельовано випадок обриву фази одного з задіяних пристроїв. У даній праці навпаки пропонується випадок її короткого замикання. Для прикладу розглядається вузол живлення асинхронних моторів від спільного трансформатора. Несиметричний стан зумовлений к. з. обмотки статора одного з заживлених моторів. Якщо таке замикання відбувається одночасно в декількох машинах, то це аж ніяк не вносить додаткових теоретичних труднощів. Для спрощення і дохідливості викладу на рис. 1 показано схему системи з двома моторами, ушкодженого й нормально функціонуючого.

Але спочатку розглянемо теорію неушкодженої системи, яку затим узагальнимо на випадок фазного короткого замикання.

### РІВНЯННЯ СИМЕТРИЧНОГО СТАНУ

Рівняння будь-якої електромагнетної системи складаються з рівнянь її елементів, що відображають їхню внутрішню природу, і структурних рівнянь, що відображають спосіб з'єднання елементів між собою.

**А-модель трансформатора.** Рівняння трансформатора цієї моделі представлені в нормальній формі Коші

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= A_1(u_1 - r_1 i_1) + A_{21}(u_2 - r_2 i_2); \\ \frac{di_2}{dt} &= A_{21}(u_1 - r_1 i_1) + A_2(u_2 - r_2 i_2), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $u_1, u_2$  – колонки напруг первинної і вторинної обмоток;  $i_1, i_2$  – колонки струмів;  $A_1, A_{12}, A_{21}, A_2$  – матриці коефіцієнтів, алгоритм обчислення яких можемо знайти в джерелах з математичного моделювання [2].

**А-модель асинхронного мотора.** Рівняння асинхронного мотора цієї моделі теж записуються в нормальній формі Коші. Скористаємося косоюнальною системою координат, при якій струми й напруги обмотки статора тотожні власним фазним величинам

$$\begin{aligned} \frac{di_S}{dt} &= A_S(u_S - r_S i_S) + A_{SR}(\Omega_R \Psi_R - r_R i_R); \\ \frac{di_R}{dt} &= A_{RS}(u_S - r_S i_S) + A_R(\Omega_R \Psi_R - r_R i_R), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $u_S, u_R$  – колонки напруг статорної і роторної обмоток;  $i_S$  – колонка статорних струмів;  $\Psi_R$  – колонка повних роторних потокозчеплень;  $\Omega_R$  – матриця кутової швидкості;  $A_S, A_{SR}, A_{RS}, A_R$  – матриці коефіцієнтів. Алгоритм обчислення перерахованих матриць і колонок

теж можемо знайти в джерелах з математичного моделювання [2]. Рівняння електромагнетного стану слід доповнити рівнянням механічного руху

$$\frac{d\omega}{dt} = f(i_S, i_R, \omega, t). \quad (3)$$

Ми не конкретизуємо до алгоритмічного рівня рівнянь (1)-(3), тільки тому, що тут це не є принципово.

Структурні рівняння електричного кола вузла живлення записуємо за першим і другим законами Кірхгофа

$$\sum_{i=1}^n i_{Si} + i_2 = 0; \quad u_{Si} = u_2, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

де  $n$  – число заживлених у вузлі моторів.

Вирази (1)-(4) утворюють повну систему алгебодиференціальних рівнянь електромеханічного стану досліджуваної електромеханічної системи.

Оскільки в таких системах не передбачається наявність нульових провідників між нульовими точками трифазних обмоток трансформатора й моторів, то в (1), (2), (4), виходячи з закону струмів Кірхгофа, опустимо і струми, і напруги фази  $C$  задіяних окремих елементів.

Основна проблема подальшого аналізу полягає у визначенні колонки невідомих напруг вузла живлення  $u_2 = (u_{2A}, u_{2B})_t$  – напруг вторинної обмотки трансформатора. Знаючи  $u_2$  на даному часовому кроці інтегрування, система  $2(n+1)$  матричних рівнянь (1), (2) і  $n$  звичайних (3) розпадаються на окремі незалежні рівняння, інтегрування яких не спричиняє будь-яких труднощів.

Продиференціюємо рівняння струмів (4) за часом

$$\sum_{i=1}^n \frac{di_{Si}}{dt} + \frac{di_2}{dt} = 0. \quad (5)$$

Підставляючи в (5) рівняння вторинної обмотки трансформатора (1) і рівняння статорних обмоток моторів (2), з урахуванням другого виразу (4) одержуємо потрібний вираз для напруг вузла

$$u_2 = AY, \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} A &= \left( A_2 + \sum_{i=1}^n A_{Si} \right)^{-1}; \\ Y &= -A_{21}(u_1 - r_1 i_1) + \\ &+ A_{21} r_2 i_2 + \sum_{i=1}^n (+A_{Si} r_{Si} - A_{SRi}(\Omega_{Ri} \Psi_{Ri} - r_{Ri} i_{Ri})). \end{aligned} \quad (7)$$

## РІВНЯННЯ НЕСИМЕТРИЧНОГО СТАНУ

Розглянемо пошкоджену систему коротким замиканням фази  $C$  в одному з моторів, для визначеності в першому, як це показано на рис. 1. Зауважимо, що вибір фази  $C$  є непринциповим.

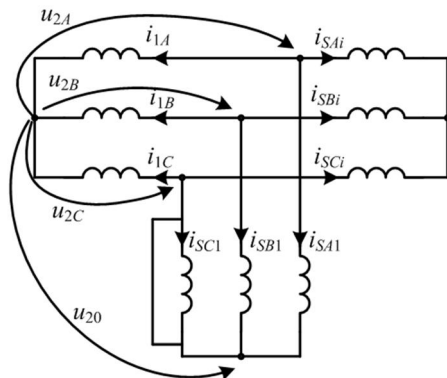


Рис. 1. Схема електромашинної системи

Запишемо диференціальні рівняння всіх трьох фаз статора ушкодженого (першого) мотора у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{SA1}}{dt} &= u_{2A} - r_{S1}i_{SA1}; & \frac{d\Psi_{SB1}}{dt} &= u_{2B} - r_{S1}i_{SB1}; \\ \frac{d\Psi_{SC1}}{dt} &= u_{2C} - r_{S1}i_{SC1}, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\Psi_{Sk1} = (k = A, B, C)$  – повні потокозчеплення фаз статора першого мотора

$$\Psi_{Sk1} = \Psi_k + L_{\sigma}i_{Sk1}, \quad (k = A, B, C), \quad (9)$$

причому  $\Psi_k$  – основні потокозчеплення;  $L_{\sigma}$  – індуктивність дисипації обмотки статора.

Коротке замикання фази  $C$  першого мотора зумовлює те, що

$$u_{20} = u_{2C}, \quad (10)$$

де  $u_{20}$  – напруга зміщення нейтралей обмоток трансформатора й першого мотора (див. рис. 1).

Якщо тепер підставити (9) у (8) і просумувати усі три рівняння (8) за тотожності, що

$$\Psi_A + \Psi_B + \Psi_C \equiv 0, \quad (11)$$

одержимо

$$u_{20} = (u_{2A} + u_{2B})/2. \quad (12)$$

Згідно з графічною побудовою (рис. 1) маємо очевидні залежності

$$u_{SA1} = u_{2A} - u_{20}; \quad u_{SB1} = u_{2B} - u_{20}; \quad u_{SC1} = 0. \quad (13)$$

На підставі (12), (13) формуємо матричне рівняння

$$u_{S1} = C_1 u_2, \quad (14)$$

де

$$C_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Підставляючи (15) у (6), одержуємо шукану корекцію першого виразу (7) на випадок короткого замикання фази  $C$  першого мотора

$$A = \left( A_2 + \sum_{i=2}^n A_{Si} + A_{S1} C_1 \right)^{-1}. \quad (16)$$

Решта виразів у (6), (7) залишаються без зміни.

У випадку наявності серед живлених моторів

синхронних метод аналізу залишається незмінним. У такому разі зазнають відповідної корекції лише рівняння (2), а відтак (7), (16).

Якщо струми й напруги задіяних моторів будуть представлені в області координатних перетворень, наприклад, у осях  $x$ ,  $y$  чи  $d$ ,  $q$ , то структурні рівняння (4) дещо ускладняться

$$\sum_{i=1}^n \Pi_i^{-1} i_{Si} + i_2 = 0; \quad \Pi_i^{-1} u_{Si} = u_2, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (17)$$

де  $\Pi_i^{-1}$  – обернені матриці координатних перетворень до фазних величин як спільного координатного базиса. Але оскільки запис диференціальних рівнянь електромоторів як елементів системи в перетворених координатах обмоток статора недоцільний, то ми відповідних примітивних корекцій формул (7), (16) не робитимемо.

## ВИСНОВОК

Запропонований метод обчислення напруг вузла живлення електромоторів, живлених від спільного трансформатора в разі короткого замикання однієї з фаз статора того чи іншого електромотора, дає можливість на кожному часовому кроці інтегрування рівнянь стану електромеханічної системи звести до інтегрування заздалегідь представлених у нормальній формі Коші рівнянь стану окремих задіяних пристроїв.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чабан В. И., Чабан О. В. Экстремальная несимметрия узла живления асинхронных моторов. – ЕіЕ, 2012/4, с. 43–44.
2. Чабан В. Математичне моделювання електромеханічних процесів. – Львів, 1997, 344 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Chaban V. I., Chaban O. V. Ekstremal'na nesimetriya uzla zhivlennya asinhronnih motoriv. - EіE, 2012/4, s. 43-44. 2. Chaban V. Matematichne modelyuvannya elektromehanichnih procesiv. - L'viv, 1997, 344 s.

Надійшла 01.03.2012

Чабан Василь Йосипович, д.т.н., проф.

Національний університет "Львівська політехніка"  
й Ряшівський університет  
79021, Львів, вул. Кульпарківська, 142, кв. 33.  
тел: (067) 7202181, e-mail: vtchaban@polynet.lviv.ua

Чабан Остап Васильович, к.т.н., доц.

Національний університет "Львівська політехніка"  
79021, Львів, вул. Акад. Лазаренка, 38, кв. 14.  
тел: (067) 6734482

Tchaban V.Y., Tchaban O.V.

### Equations of electric motor power supply unit dissymmetry under phase short-circuit fault.

In the paper, a formula is introduced for calculating electric motor supply unit voltage under feeding by a common transformer in the condition of a phase short-circuit in one of the motors. The formula is used in every time step of electromechanical state equations integration.

**Key words** – power supply unit, transformer, electric motor phase short-circuit.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С КАСКАДНЫМ МНОГОУРОВНЕВЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

*Запропонована методика побудови комп'ютерної моделі електропривода змінного струму з каскадним багаторівневим інвертором напруги. На основі розробленої методики створена Matlab-модель частотно-регульованого електропривода, що здатна працювати у квазісталих і перехідних режимах.*

*Предложена методика построения компьютерной модели электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения. На основе разработанной методики создана Matlab-модель частотно-регулируемого электропривода, способная работать в квазистационарных и переходных режимах.*

### ВВЕДЕНИЕ

Все чаще в мощных регулируемых электроприводах переменного тока применяются преобразователи частоты на основе многоуровневых инверторов (МУИПЧ). Эти преобразователи хорошо зарекомендовали себя в установках добычи нефти и газа, в системах электроснабжения и распределения электроэнергии, на водном и железнодорожном транспорте, на коммунальных предприятиях и других объектах, где эксплуатируются мощные электроприводы среднего напряжения [1, 2].

Многочисленные публикации нескольких последних лет, посвященные многоуровневым инверторам (МИ), подчеркивают непрекращающийся интерес специалистов силовой электроники к этому типу преобразователей [1-9]. На сегодняшний день топология многоуровневых преобразователей включает в себя три основных схемных подхода: многоуровневые инверторы с фиксацией нейтрали (или с емкостным делителем напряжения – топология преобразования NPC), многоуровневые инверторы с плавающим конденсатором (FC) и каскадные многоуровневые инверторы (СНВ) [6]. В соответствии со схемотехническими отличиями каждый из перечисленных типов преобразователей нашел свою эксплуатационную и коммерческую нишу на рынке преобразовательных устройств для электропривода.

Относительной простотой вентильной схемы обладают многоуровневые каскадные инверторы напряжения. Благодаря однотипной многоячейковой структуре, позволяющей добиваться высоких уровней выходного напряжения, каскадные инверторы получили распространение в системах электроснабжения и регулируемом электроприводе переменного тока номинальной мощностью до 30 MW при напряжении до 13.8 kV [9]. Вторым преимуществом модульного построения силовой схемы является удобство обслуживания и быстрый ремонт преобразователя, путем замены вышедшей из строя инверторной ячейки.

Перед промышленным изготовлением опытного образца полупроводникового преобразователя одним из промежуточных этапов является этап построения компьютерной модели всей преобразовательной системы. Подобные модели позволяют провести количественную и качественную оценку работы преобразовательной системы, а в ряде случаев, сопоставить результаты моделирования с данными, полученными на существующих образцах альтернативных преобразовательных систем.

Уровень развития средств компьютерного моделирования позволяет создавать подробные виртуальные модели, имитирующие с высокой степенью точности промышленные физические образцы преобразовательных систем, и способные работать как в статических, так и динамических режимах в заданном масштабе реального времени.

В данной статье описана разработанная компьютерная Matlab-модель электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения и выполнен анализ данных, полученных с помощью моделирования.

### СХЕМА СИЛОВОЙ ЦЕПИ И ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ МУИПЧ

В силовую схему каскадного многоуровневого инвертора может входить от трех до десяти инверторных ячеек, последовательно включенных в каждую фазу [9]. В качестве исследуемой, на рис. 1 изображена структурная силовая схема электропривода на основе 13-уровневого МУИПЧ и асинхронного двигателя на номинальную мощность 8 MW.

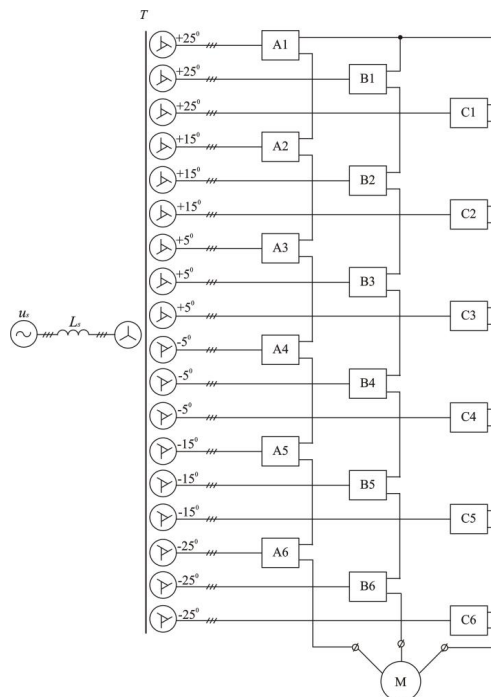


Рис. 1. Структурная силовая схема электропривода на основе МУИПЧ

© Г.Г. Жемеров, Д.В. Тугай, И.Г. Титаренко



Преобразователь состоит из 18 симметричных инверторных ячеек, по 6 последовательно соединенных ячеек на каждую фазу нагрузки, обеспечивающих на зажимах двигателя действующее значение линейного напряжения 10 kV. Максимальное количество уровней выходного напряжения определяется по соотношению

$$L_{ph} = 2 \cdot k + 1, \quad (1)$$

где  $k$  – количество ячеек в фазе.

Схема силовых цепей инверторной ячейки, состоящая из входного трехфазного неуправляемого выпрямителя на диодах  $D1-D6$ , конденсатора  $C$  и выходного однофазного мостового инвертора на транзисторных модулях  $T1-T4$ , представлена на рис. 2.

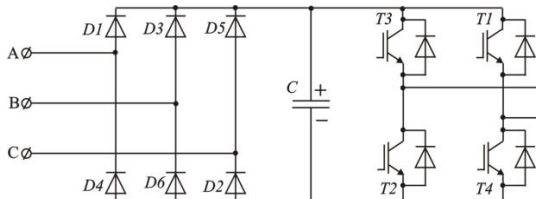


Рис. 2. Схема силовых цепей инверторной ячейки

Инверторные ячейки запитываются отдельно от соответствующих трехфазных вентиляльных обмоток фазосдвигающего трансформатора Т (см. рис. 1), соединенных по схеме "зигзаг", что обеспечивает необходимый фазовый сдвиг для каждого уровня выходного напряжения.

Наиболее сложным конструктивным элементом силовой схемы МУИПТ является фазосдвигающий трансформатор Т, количество трехфазных вентиляльных обмоток которого соответствует количеству инверторных ячеек. Первичная обмотка трансформатора соединена по схеме "звезда". Схема соединения вентиляльных обмоток будет зависеть от количества инверторных ячеек в фазе нагрузки. На рис. 3,а показана схема трехфазного многообмоточного трансформатора при нечетном числе ячеек в каждой фазе инвертора, а на рис. 3,б – при четном количестве ячеек. При четном количестве ячеек (рис. 3,б), как в рассматриваемом случае (см. рис. 1), половина вентиляльных обмоток трансформатора соединяется по схеме "зигзаг", а вторая половина по схеме "обратный зигзаг". Схема трансформатора по рис. 3,а отличается от вышерассмотренной наличием переходной вентиляльной обмотки, соединенной в треугольник, ее условно можно считать "центром симметрии" группы вентиляльных обмоток. Обмотка, включенная в треугольник, обеспечивает нулевой угол сдвига, остальные обмотки включаются аналогично схеме по рис. 3,б.

Величину действующего значения линейного напряжения вентиляльной обмотки можно определить в соответствии с рис. 4, на котором показано включение ячеек инвертора, для создания необходимого напряжения на шинах нагрузки. Из рис. 4 видно, что фазное напряжение на нагрузке формируется суммой напряжений ячеек инвертора, поэтому действующее значение линейного напряжения любой вторичной обмотки можно определить из соотношения

$$U_{2n} = \frac{U_{\Delta}}{k \cdot \sqrt{3}}. \quad (2)$$

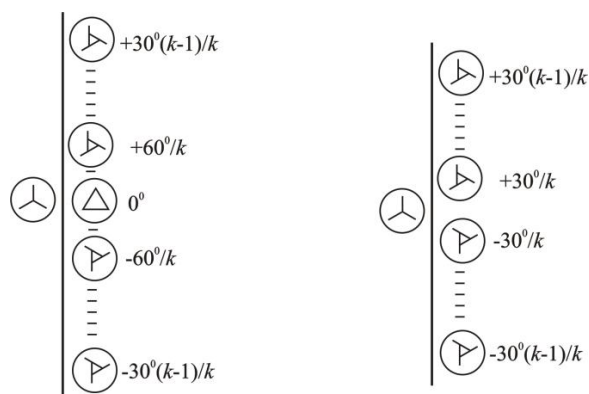


Рис. 3. Обобщенная схема многообмоточного трансформатора: а – при нечетном количестве ячеек в фазе инвертора; б – при четном количестве ячеек в фазе инвертора

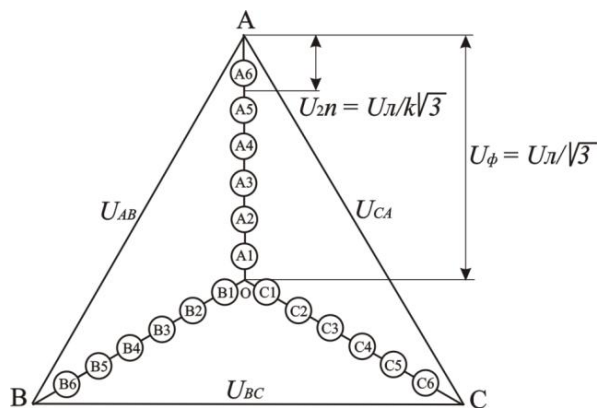


Рис. 4. Определение номинального напряжения вентиляльной обмотки

При соединении вторичных обмоток в "треугольник" (в случае нечетного количества ячеек в фазе)

$$U_{\Delta 2} = \sqrt{3} \cdot U_{2n}. \quad (3)$$

Соотношения для определения номинальных напряжений полуобмоток при соединении в "зигзаг" можно получить из векторной диаграммы (рис. 5):

$$U_{Z21n} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot U_{2n} \cdot \sin \varphi; \quad (4)$$

$$U_{Z22n} = U_{2n} \cdot \left( \cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}} \right),$$

где  $U_{Z21n}$ ,  $U_{Z22n}$  – соответственно номинальные напряжения первой и второй полуобмоток  $n$ -ной обмотки трансформатора;  $\varphi$  – угол сдвига вектора вторичного напряжения относительно оси ОА трехосной системы координат (см. рис. 5).

Угол сдвига вектора вторичного напряжения  $n$ -ной обмотки определяется из условия

$$\varphi = \frac{60}{k} \cdot n_1 - \quad (5)$$

при нечетных  $k$ , где  $n_1 = 1, 2, 3, \dots, \frac{k-1}{2}$ ;

$$\varphi = \frac{60}{2 \cdot k} \cdot (2 \cdot n_2 - 1) - \quad (6)$$

при четных  $k$ , где  $n_2 = 1, 2, 3 \dots \frac{k}{2}$ .

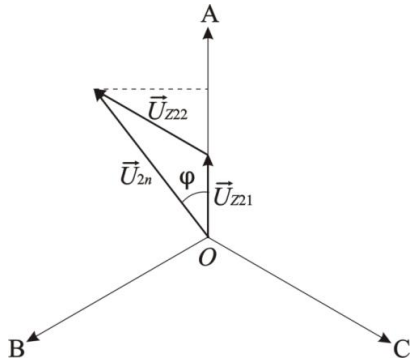


Рис. 5. Векторная диаграмма для определения номинального напряжения полуобмоток трансформатора при соединении в "зигзаг"

Параметры элементов инверторных ячеек, выбираются из соответствующих требований к однофазным инверторам напряжения с учетом мощности нагрузки.

В табл. 1. приведены параметры элементов силовой схемы МУИПЧ, учет которых необходим для разработки Matlab-модели.

Таблица 1

Параметры элементов силовой схемы МУИПЧ

| Параметр   | Обозначение  | Значение |
|--|--------------|----------|
| Питающая сеть  |              |          |
| Действующее значение линейного напряжения  | $U_s$        | 10000 V  |
| Сетевая частота  | $f_0$        | 50 Hz    |
| Индуктивность фазы   | $L_0$        | 1.27 мН  |
| Многообмоточный фазосдвигающий трансформатор                                     |              |          |
| Количество первичных трехфазных обмоток  | $N_{W1}$     | 1        |
| Количество трехфазных вентильных обмоток   | $N_{W2}$     | 18       |
| Номинальная мощность   | $S_{ном,мп}$ | 8 MVA    |
| Номинальная частота  | $f_{ном}$    | 50 Hz    |
| Действующее значение номинального линейного напряжения первичной обмотки         | $U_{1мп}$    | 10000 V  |
| Действующее значение номинального линейного напряжения вентильной обмотки        | $U_{мпн}$    | 962 V    |
| Относительное омическое сопротивление первичной обмотки трансформатора           | $R_{1*}$     | 0.004    |
| Относительное омическое сопротивление вентильных обмоток трансформатора          | $R_{н*}$     | 0.004    |
| Относительное значение индуктивности рассеяния вентильных обмоток трансформатора | $L_{н*}$     | 0.08     |
| Инверторная ячейка   |              |          |
| Количество ячеек в фазе преобразователя  | $k$          | 6        |
| Максимальное количество уровней выходного напряжения                             | $L_{ph}$     | 13       |
| Тип диода неуправляемого выпрямителя   | SKKD 701/16  |          |

Продолжение таблицы 1

| Параметр  | Обозначение      | Значение                       |
|---|------------------|--------------------------------|
| Сопrotивление снаббера диода                                | $R_{SD}$         | 100 $\Omega$                   |
| Емкость снаббера диода                                      | $C_{SD}$         | 0.5 $\mu F$                    |
| Динамическое сопротивление прямой ветви ВАХ диода           | $R_{onD}$        | 0.28 м $\Omega$                |
| Пороговое напряжение диода                                  | $U_f$            | 1 V                            |
| Тип транзисторного модуля                                   | SKM 800GA176D    |                                |
| Сопrotивление снаббера модуля                               | $R_{SM}$         | 200 $\Omega$                   |
| Емкость снаббера диода                                      | $C_{SM}$         | 0.5 $\mu F$                    |
| Динамическое сопротивление                                  | $R_{onM}$        | 1.7 м $\Omega$                 |
| Пороговое напряжение на транзисторе и диоде модуля          | $U_{JT}, U_{JD}$ | 2 V                            |
| Время спада и нарастания тока через прибор при переключении | $T_f, T_t$       | 0.23 $\mu s$ ,<br>1.03 $\mu s$ |
| Энергия потерь включения транзистора                        | $E_{on}$         | 335 мJ                         |
| Энергия потерь выключения транзистора                       | $E_{off}$        | 245 мJ                         |
| Энергия потерь переключения обратного диода                 | $E_{rr}$         | 155 мJ                         |
| Емкость конденсатора  | $C$              | 19.5 мF                        |
| Кабельная линия   |                  |                                |
| Длина кабельной линии                                       | $l_{line}$       | 150 m                          |
| Омическое сопротивление кабельной линии                     | $R_{line}$       | 0.018 $\Omega$                 |
| Асинхронный двигатель                                       |                  |                                |
| Номинальная мощность  | $P_H$            | 8 MVA                          |
| Номинальное линейное напряжение обмоток статора             | $U_1$            | 10000 V                        |
| Резистивное сопротивление обмотки статора                   | $r_1$            | 0.03 $\Omega$                  |
| Индуктивность рассеяния обмотки статора                     | $L_1$            | 1.93 мН                        |
| Сопrotивление обмотки ротора                                | $r'_2$           | 0.089 $\Omega$                 |
| Индуктивность рассеяния обмотки ротора                      | $L'_2$           | 1.25 мН                        |
| Взаимная индуктивность обмоток                              | $L_m$            | 0.076 Н                        |
| Инерционная постоянная                                      | $H$              | 0.4 s                          |
| Число пар полюсов   | $p$              | 2                              |

#### MATLAB-МОДЕЛЬ МУИПЧ

Matlab-модель электропривода с асинхронным двигателем номинальной мощности  $P_H = 8$  МВт на напряжение  $U = 10$  кВ с преобразовательной системой на основе 13-уровневого каскадного инвертора напряжения (рис. 6) состоит из четырех основных типов блоков:

1. Блоки силовой схемы (1-23).
2. Блоки подсистем системы управления (24, 25).
3. Блоки измерительных подсистем (32, 33, 40).
4. Блоки измерительных приборов (осциллопов) (41-46).

Отдельно рассмотрим устройство основных блоков модели.

Силовая схема модели включает в себя:

- трехфазный источник синусоидального напряжения, имитирующий трехфазную промышленную сеть напряжением 10 кВ и частотой 50 Hz при полной мощности трехфазного индуктивного короткого замыкания 250 MVA (блок 1);

- многообмоточный трансформатор (блок 2);

- инверторные ячейки (блоки 3-20);

- сопротивление линии моделирует резистивное

сопротивление протяженной кабельной линии, соединяющей зажимы преобразователя и двигателя (блок 21). Этот же блок учитывает индуктивность выходного L-C фильтра;

- сглаживающий выходной трехфазный C-фильтр,

предназначенный для подавления высокочастотной составляющей напряжения на зажимах двигателя (блок 22);

- трехфазный асинхронный двигатель номинальной мощностью 8 MW на напряжение 10 kV (блок 23).

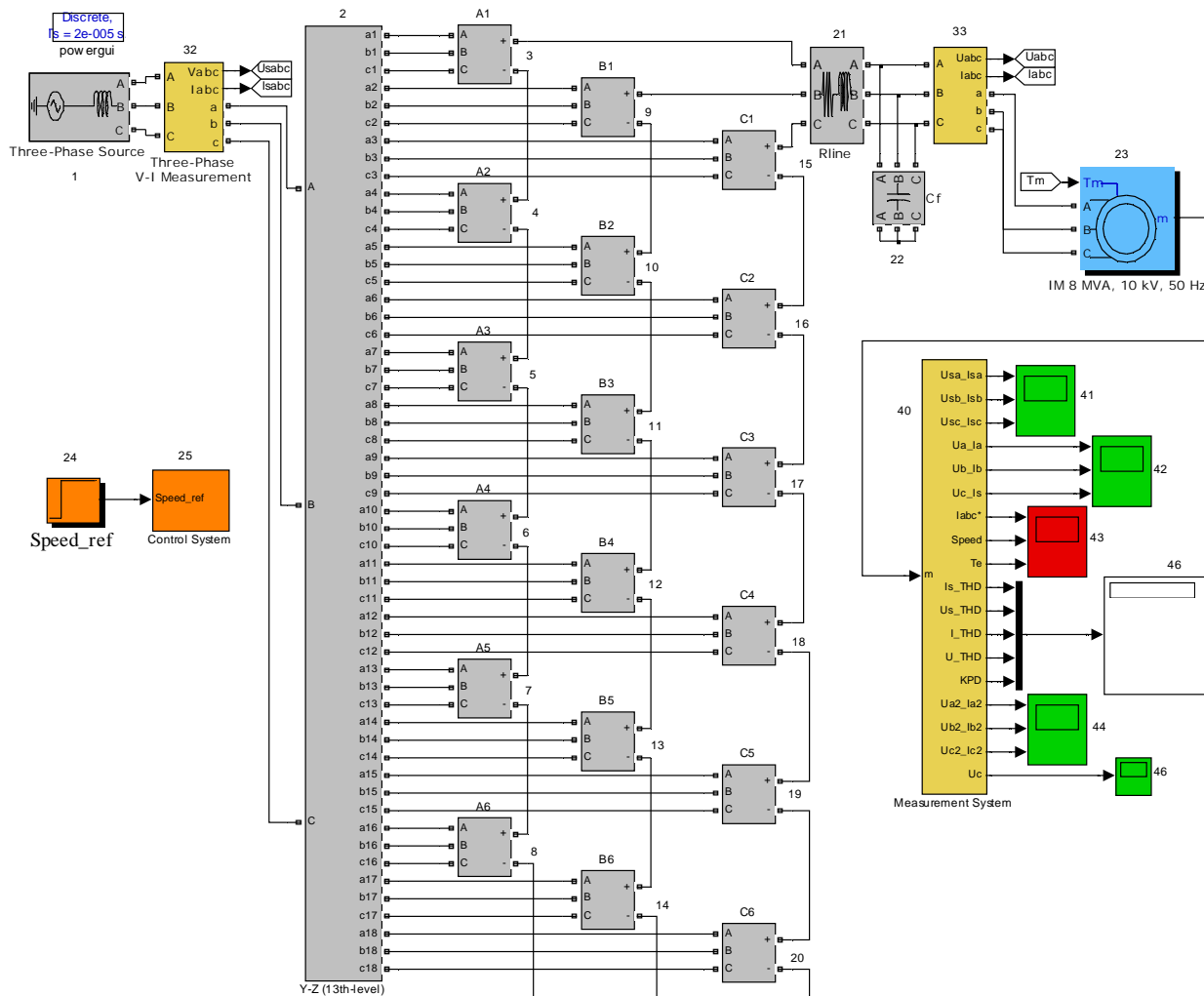


Рис. 6. Matlab-модель МУИПЧ

Из перечисленных блоков особый интерес представляет блок 2 – многообмоточный фазосдвигающий трансформатор. В настоящей работе предложена методика синтеза многообмоточных трансформаторов для МУИПЧ на основе стандартных блоков библиотеки SimPowerSystems. Блок 2 состоит из трех одинаковых многообмоточных трансформаторов T1, T2, T3 (Multi-Winding Transformer), каждый из которых моделирует одну фазу трехфазного трансформатора. Трансформатор T1 включает все обмотки фазы А, трансформатор T2 включает все обмотки фазы В, трансформатор T3 включает все обмотки фазы С. Способы соединения выводов обмоток "зигзаг" при нечетных  $k$  представлены в табл. 2, а при четных  $k$  – в табл. 3.

Табл. 2 и 3 позволяют выполнить соединения обмоток в "зигзаг" в зависимости от количества инверторных ячеек в фазе нагрузки.

Matlab-модель системы управления включает в себя два подсистемных блока – блок задания скорости (блок 24), выполненный на основе библиотечного

элемента Timer и блок системы управления инвертором (блок 25). Внутри блока 25 расположен блок 26 – Control, как показано на рис. 7, формирующий сигналы задания для системы управления инвертором в зависимости от информации, внесенной в блок 24. Структурная схема блока представлена на рис. 8.

Модель схемы по рис. 7 использует принцип векторного управления, основанный на регулировании составляющих вектора тока статора, направленных по и перпендикулярно вектору потокосцепления ротора. Систему блока расчета сигналов управления инвертором модели можно представить состоящей из трех узлов: регулятора скорости, регулятора потокосцепления ротора и узла вычисления задания фазных напряжений.

Регулятор скорости представляет собой дискретный ПИ регулятор (блок Speed\_Reg), на входы узла сравнения которого (блок Sum) поступают сигналы с выхода датчика интенсивности speed\* и обратной связи по скорости ротора Speed. Регулятор скорости вырабатывает сигнал задания момента  $T_e^*$ .

Таблица 2

Подключение выводов обмоток Z при нечетных k (n<sub>0</sub> = 1...k)

| Соedенение, № трансф-ра                     | Выводы блоков Multi-Winding Transformer |  |  |   |
|---|---|--|--|---|
|   | +2·n <sub>0</sub>                       | 2·n <sub>0</sub>   | +2·n <sub>0</sub> +1   | 2·n <sub>0</sub> +1   |
| Выводы подключения нагрузки                 | k+3...<br>...4·k+4                      | -  | 1...k  | -   |
| Выводы соединаения в общую точку T1, T2, T3 | 1...k                                   | -  | $\frac{2 \cdot k + 5}{2} \dots$<br>$\frac{4 \cdot k + 3}{2}$ | -   |
| Выводы соединаения +Z T1 и T2               | -                                       | 1...k<br>T1  | -  | 1...k<br>T2   |
| Выводы соединаения +Z T3 и T1               | -                                       | 1...k<br>T3  | -  | 1...k<br>T1   |
| Выводы соединаения +Z T2 и T3               | -                                       | 1...k<br>T3  | -  | 1...k<br>T1   |
| Выводы соединаения -Z T1 и T2               | -                                       | $\frac{2 \cdot k + 5}{2} \dots$<br>$\frac{4 \cdot k + 3}{2}$ T | -  | $\frac{2 \cdot k + 5}{2} \dots$<br>$\frac{4 \cdot k + 3}{2}$ T2 |
| Выводы соединаения -Z T3 и T1               | -                                       | $\frac{2 \cdot k + 5}{2} \dots$<br>$\frac{4 \cdot k + 3}{2}$ T | -  | $\frac{2 \cdot k + 5}{2} \dots$<br>$\frac{4 \cdot k + 3}{2}$ T1 |
| Выводы соединаения -Z T2 и T3               | -                                       | $\frac{2 \cdot k + 5}{2} \dots$<br>$\frac{4 \cdot k + 3}{2}$ T | -  | $\frac{2 \cdot k + 5}{2} \dots$<br>$\frac{4 \cdot k + 3}{2}$ T  |

Таблица 3

Подключение выводов обмоток Z при четных k (n<sub>0</sub> = 1...3·k)

| Соedенение, № трансф-ра                     | Выводы блоков Multi-Winding Transformer |   |                      |   |
|---|---|---|----------------------|---|
|   | +2·n <sub>0</sub>                       | 2·n <sub>0</sub>                                | +2·n <sub>0</sub> +1 | 2·n <sub>0</sub> +1                             |
| Выводы подключения нагрузки                 | -                                       | -   | 1...3·k              | -   |
| Выводы соединаения в общую точку T1, T2, T3 | 1...3·k                                 | -   | -                    | -   |
| Выводы соединаения +Z T1 и T2               | -                                       | 1...3·k/2<br>T1                                 | -                    | 1...3·k/2<br>T2                                 |
| Выводы соединаения +Z T3 и T1               | -                                       | 1...3·k/2<br>T3                                 | -                    | 1...3·k/2<br>T1                                 |
| Выводы соединаения +Z T2 и T3               | -                                       | 1...3·k/2<br>T3                                 | -                    | 1...3·k/2<br>T1                                 |
| Выводы соединаения -Z T1 и T2               | -                                       | $\frac{3 \cdot k + 2}{2} \dots$<br>...3·k<br>T1 | -                    | $\frac{3 \cdot k + 2}{2} \dots$<br>...3·k<br>T2 |
| Выводы соединаения -Z T3 и T1               | -                                       | $\frac{3 \cdot k + 2}{2} \dots$<br>...3·k<br>T3 | -                    | $\frac{3 \cdot k + 2}{2} \dots$<br>...3·k<br>T1 |
| Выводы соединаения -Z T2 и T3               | -                                       | $\frac{3 \cdot k + 2}{2} \dots$<br>...3·k<br>T3 | -                    | $\frac{3 \cdot k + 2}{2} \dots$<br>...3·k<br>T1 |

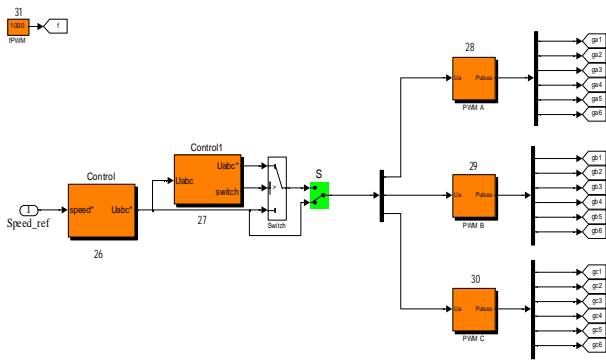


Рис. 7. Структурная схема блока Control System

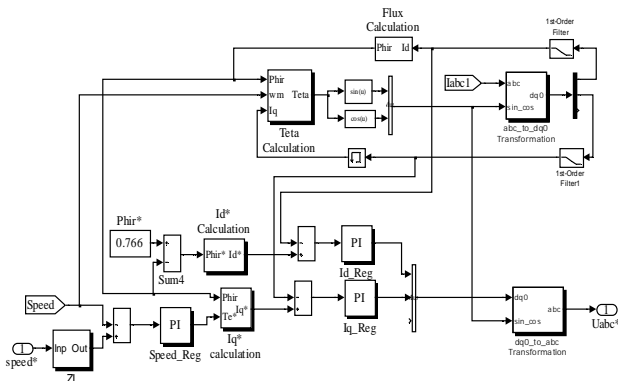


Рис. 8. Структурная схема блока Control

На вход узла сравнения Sum4 поступают сигналы задания потокосцепления ротора  $\Phi_{ir}^*$  и сигнал обратной связи по потокосцеплению  $\Phi_{ir}$ , рассчитанный в блоке Flux Calculation по соотношению

$$\Psi_r = L_m^* \cdot I_d \cdot H, \quad (7)$$

где

$$H = \frac{1}{1 + T_{r,s}} \quad (8)$$

$H$  – передаточная функция;  $I_d$  – составляющая вектора тока обратной связи по оси  $d$ ;  $L_m^*$  – относительное значение взаимной индуктивности.

Постоянная времени для передаточной функции вычисляется по соотношению

$$T = \frac{L_2^* + L_2'^*}{\omega_0 \cdot r_2'^*}, \quad (9)$$

где  $L_2^*$ ,  $r_2'^*$  – соответственно относительные приведенные индуктивность рассеяния и резистивное сопротивление ротора при  $S = 1$ ;  $\omega_0$  – угловая частота (314 rad/s).

Значения токов обратной связи  $I_d$ ,  $I_q$  получаем при помощи блока abc\_to\_dq0 Transformation, подавая на его вход сигнал обратной связи по фазным токам статора и рассчитанные в блоке Theta Calculation значения синуса и косинуса угла положения вектора потокосцепления ротора

$$I_q = \frac{2}{3} \cdot \left( \begin{array}{l} i_a \cdot \cos \theta + i_b \cdot \cos \left( \theta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) + \\ + i_c \cdot \cos \left( \theta + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \end{array} \right), \quad (10)$$

$$I_d = \frac{2}{3} \cdot \left( \begin{array}{l} i_a \cdot \sin \theta + i_b \cdot \sin \left( \theta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) + \\ + i_c \cdot \sin \left( \theta + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \end{array} \right).$$

Угол положения вектора потокосцепления ротора рассчитывается в блоке Theta Calculation

$$\theta = \int (\omega_r + \omega_m) dt, \quad (11)$$

где

$$\omega_r = \frac{L_{M^*} \cdot I_q}{T \cdot \Psi_r} - \quad (12)$$

– скорость вращения ротора;  $\omega_m$  – механическая скорость ротора.

Значения токов задания  $I_{d^*}$ ,  $I_{q^*}$  рассчитываются соответственно в блоках Id\* Calculation и Iq\* Calculation

$$I_{d^*} = \frac{\Psi_r}{L_{M^*}}, \quad (13)$$

$$I_{q^*} = \frac{(L_{M^*} + L_{2^*}) \cdot \Psi_r}{L_{M^*} \cdot T_{e^*}}.$$

Рассчитанные токи управления  $I_{dreg}$ ,  $I_{qreg}$  получаем в блоках Id\_reg и Iq\_reg, представляющих собой дискретные ПИ регуляторы, на вход которых поступают соответствующие сигналы рассогласования с узлов сравнения Sum1 и Sum2.

Сигналы управления инвертором рассчитываются в блоке dq0\_to\_abc Transformation, выполняющем обратный переход от системы координат dq0 в abc

$$u_{areg} = I_{dreg} \cdot \sin \theta + I_{qreg} \cdot \cos \theta,$$

$$u_{breg} = 0.5 \cdot \left[ \begin{array}{l} (\sqrt{3} \cdot \sin \theta - \cos \theta) \cdot I_{qreg} - \\ - (\sin \theta + \sqrt{3} \cdot \cos \theta) \cdot I_{dreg} \end{array} \right], \quad (14)$$

$$u_{creg} = -u_{areg} - u_{breg}.$$

В структуру блока системы управления входит блок 27 (см. рис. 7), выполняющий функцию фиксации параметров (амплитуды, частоты и фазы) сигналов управления инвертором в момент времени, когда частота вращения ротора равна заданной частоте и переадресации рассчитанных по полученным параметрам фиксированных сигналов в систему управления инвертора. Блок 27 выполняет синхронизацию сигналов с выхода блока 26, при этом переключение на систему управления Control1 производится в момент  $u_{areg} = 0$ .

Блоки формирования и распределения импульсов управления (блоки 28-30) представляют собой симметричные подсистемы PWM A, PWM B, PWM C, в состав которых входит по шесть ШИМ-генераторов PWM1-PWM6, передающих импульсы управления на инверторные ячейки соответствующего уровня. Модель ШИМ-генератора для первой ячейки представлена на рис. 9.

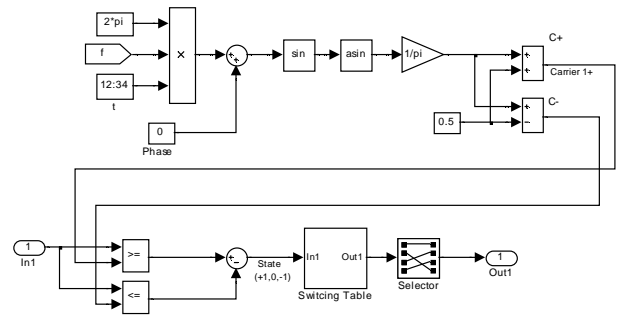


Рис. 9. Модель ШИМ-генератора для транзисторов первой ячейки

Модель по рис. 9 производит формирование двух вертикальных уровней высокочастотного треугольного пилообразного напряжения "0 +1" и "0 -1" и их сравнение с входным синусоидальным сигналом управления, формируемого блоком 26. Перераспределение импульсов на транзисторы ячейки инвертора производится в соответствии с таблицей переключений (блок Switching Table) и при помощи блока Selector. Начальная фаза треугольного напряжения задается в блоке Phase (для первой ячейки она равна нулю). Для остальных пяти ячеек фазовый сдвиг рассчитывается по соотношению

$$\varphi_0 = \frac{n \cdot \pi}{3}, \quad (15)$$

где  $n = 1, 2, 3 \dots k - 1$ .

Группа блоков измерительных подсистем состоит из трехфазных датчиков напряжения и тока (блоки 32-39) и измерительной системы (блок 40) Блоки 34-39 находятся внутри ячеек инвертора A1-A6. Измерительная система предназначена для преобразования измеряемых сигналов и вывода их на измерительные приборы. В блок 40 поступает информация со всех датчиков модели и производится ее обработка. На выходные порты блока 40 выводятся информация об электромагнитных процессах, проходящих в модели электропривода.

Расчет коэффициентов несинусоидальности производится с помощью стандартных блоков THD (discrte). Постоянная составляющая выделяется при помощи низкочастотного фильтра (Lowpass Filter).

Коэффициент полезного действия рассчитывается путем измерения мгновенной мощности на входе и выходе преобразователя и усреднения полученных значений. Учет динамических потерь в полупроводниковых модулях, возникающих при переключениях с высокой частотой, производится в блоке dPdin. После усреднения мощности динамических потерь ее величина вычитается из усредненной мощности на выходе преобразователя. Деление получившегося значения полезной мощности на усредненное значение входной мощности определяет величину КПД преобразователя

$$\eta = \frac{P_{out} - \Delta P_{din}}{P_{in}}, \quad (16)$$

где

$$P_{out} = \int_0^{T_1} (u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c) dt$$

$$P_{in} = \int_0^{T_2} (u_{sa} \cdot i_{sa} + u_{sb} \cdot i_{sb} + u_{sc} \cdot i_{sc}) dt$$
(17)

$P_{out}$ ,  $P_{in}$  – усредненные значения мощности соответственно на выходе и входе преобразователя (с учетом длины кабельной линии);  $\Delta P_{din}$  – суммарные динамические потери в транзисторных модулях инвертора.

### ДЕМОНСТРАЦИЯ РАБОТЫ MATLAB-МОДЕЛИ МУИПЧ

Синтезированная Matlab-модель позволяет исследовать статические и динамические режимы работы электропривода в масштабе реального времени. На рис. 10 представлены осциллограммы тока статора, скорости ротора и электромагнитного потока двигателя при разгоне до частоты 25 Hz с последующим переходом на частоту 45 Hz в вентиляторном режиме. Как видно из рис. 10 при обеспечении плавного пуска двигателя токи статора в переходных режимах не превышают допустимых значений.

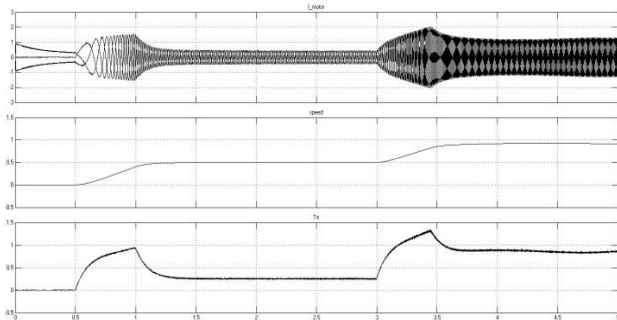


Рис. 10. Осциллограммы токов статора, скорости ротора и электромагнитного момента двигателя при его разгоне и последующем переходе с частоты 25 Hz на частоту 45 Hz

На рис. 11 показаны осциллограммы напряжения и тока двигателя для трех фаз в установившемся режиме при частоте на выходе 50 Hz. Из рисунка видно, что форма кривых напряжения и тока двигателя близка к синусоидальной. Кривая тока, изображена на рис. 11 тонкой линией и приводится в пятикратном увеличении.

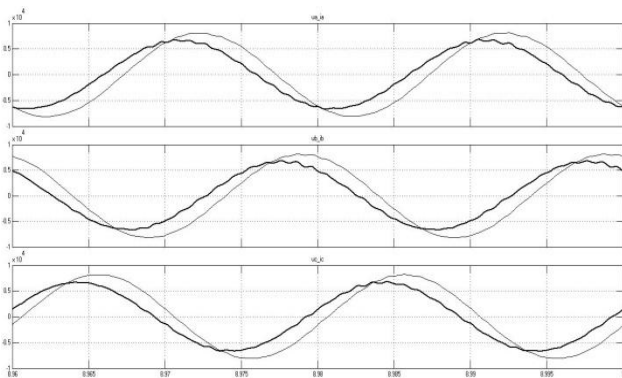


Рис. 11. Осциллограммы напряжения и тока двигателя для трех фаз в установившемся режиме при частоте на выходе 50 Hz

В табл. 4. представлены результаты расчета коэффициентов несинусоидальности токов и напряжений на входе и выходе преобразователя, а также коэффициента полезного действия при изменении частоты на выходе от 10 до 50 Hz

Таблица 4

Значения коэффициентов несинусоидальности токов и напряжений на входе и выходе преобразователя и КПД при изменении частоты на выходе от 10 до 50 Hz

| Частота на выходе | Результаты измерений |       |          |          | КПД, % |
|-------------------|----------------------|-------|----------|----------|--------|
|                   | THD, %               |       |          |          |        |
| $f$ , Hz          | $I_s$                | $U_s$ | $I_{AM}$ | $U_{AM}$ |        |
| 50                | 0.71                 | 0.39  | 1.55     | 2.8      | 96.53  |
| 45                | 1.11                 | 0.34  | 1.56     | 3.21     | 96.87  |
| 40                | 1.17                 | 0.27  | 2.02     | 3.36     | 97     |
| 35                | 1.31                 | 0.2   | 2.57     | 3.76     | 96.86  |
| 30                | 1.25                 | 0.16  | 3.68     | 3.73     | 96.34  |
| 25                | 1.4                  | 0.11  | 3.5      | 3.99     | 94.87  |
| 20                | 2                    | 0.1   | 3.4      | 4.5      | 91.47  |
| 15                | 3.37                 | 0.066 | 3.58     | 5.57     | 84.02  |
| 10                | 8.2                  | 0.046 | 3.76     | 7.63     | 62.76  |

На рис. 12 представлена зависимость КПД преобразователя от частоты на выходе  $\eta = F(f)$ , полученная методом аппроксимации результатов моделирования. Как и следовало ожидать, снижение частоты вращения ротора ниже 20 Hz (1200 об/мин) вызывает значительное снижение КПД преобразователя.

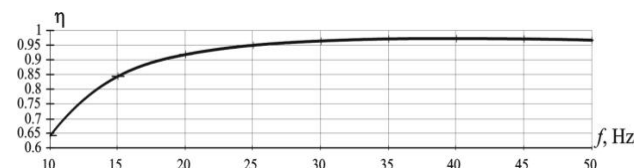


Рис. 12. Зависимость КПД преобразователя от частоты на его выходе

### ВЫВОДЫ

1. На сегодняшний день одним из наиболее распространенных преобразователей для частотно-регулируемого высоковольтного электропривода является многоуровневый инвертор напряжения.

2. На проектной стадии разработки вентиляционного преобразователя необходимо уделять внимание построению компьютерной модели преобразовательной системы в целом, учитывающей параметры силовой схемы и системы управления, и позволяющей оценить электромагнитные процессы как в квазиустановившихся, так и в переходных режимах.

3. Разработана Matlab-модель электропривода переменного тока номинальной мощностью 8 MW, выполненная на основе многоуровневого каскадного инвертора напряжения и асинхронного двигателя.

4. Предложена методика создания многообмоточного фазосдвигающего трансформатора для МУИПЧ с использованием стандартных блоков библиотеки SimPowerSystems, позволяющая моделировать многообмоточные трансформаторы при любом количестве инверторных ячеек.

5. В среде Matlab реализована методика расчета КПД, учитывающая динамические потери в полупроводниковых приборах.

6. Данные снятые с Matlab-модели электропривода позволяют судить о ее корректной работе в квазиустановившихся и переходных режимах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Rodriguez, J.S. Lai and F.Z. Peng. "Multilevel inverters: A survey of topologies, control and applications", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, Aug. 2002, pp. 724-738.
2. L.G. Franquelo, J. Rodriguez, J.I. Leon S. Kouro, R. Portillo and M. A. M. Prats. "The age of multilevel converters arrives", IEEE Ind. Electron., Mag., vol. 2, Jun. 2008, pp.28-39.
3. R.D. Klug and Klaassen. "Highpower medium voltage drives – Innovation, portfolio, trends", in Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl., 2005, p.p. 1-10.
4. J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J.O. Ponu, and S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drivers", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 6, Dec. 2007, pp. 2930-2945.
5. J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro, J.I. Leon, R.C. Portillo, M.A.M. Prats, and M.A. Perez. "Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications", Proc. IEEE, vol. 97, no. 11, Nov. 2009, pp. 1786-1819.
6. S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Perez, J. L. Leon. "Recent advances and industrial applications of multilevel converters", IEEE Trans.Ind.Electron., vol. 57, no.8, Aug. 2010, pp. 2084-2096.
7. Донской Н., Иванов А., Матисон В., Ушаков И. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // Силовая электроника. – №1. – 2008. – С. 43-46.
8. Шавелкин А.А. Вариант схемы многоуровневого преобразователя частоты для электропривода среднего напряжения // Электротехника. – 2005. – № 11.
9. M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodrigues, A. P. Marselo "A survey on cascaded multilevel inverters". IEEE Trans.Ind.Electron., vol. 57, July. 2010, p.p. 2197-2206.

**Bibliography (transliterated):** 1. J. Rodriguez, J.S. Lai and F.Z. Peng. "Multilevel inverters: A survey of topologies, control and applications", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, Aug. 2002, pp. 724-738. 2. L.G. Franquelo, J. Rodriguez, J.I. Leon S. Kouro, R. Portillo and M. A. M. Prats. "The age of multilevel converters arrives", IEEE Ind. Electron., Mag., vol. 2, Jun. 2008, pp.28-39. 3. R.D. Klug and Klaassen. "Highpower medium voltage drives - Innovation, portfolio, trends", in Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl., 2005, p.p. 1-10. 4. J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J.O. Ponu, and S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drivers",

IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 6, Dec. 2007, pp. 2930-2945. 5. J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro, J.I. Leon, R.C. Portillo, M.A.M. Prats, and M.A. Perez. "Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications", Proc. IEEE, vol. 97, no. 11, Nov. 2009, pp. 1786-1819. 6. S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Perez, J. L. Leon. "Recent advances and industrial applications of multilevel converters", IEEE Trans.Ind.Electron., vol. 57, no.8, Aug. 2010, pp. 2084-2096. 7. Донской Н., Иванов А., Матисон В., Ушаков И. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // Силовая электроника. – №1. – 2008. – С. 43-46. 8. Шавелкин А.А. Вариант схемы многоуровневого преобразователя частоты для электропривода среднего напряжения // Электротехника. – 2005. – № 11. 9. M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodrigues, A. P. Marselo "A survey on cascaded multilevel inverters". IEEE Trans.Ind.Electron., vol. 57, July. 2010, p.p. 2197-2206.

Поступила 19.11.2012

*Жемеров Георгий Георгиевич, д.т.н., проф.*  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел./факс: (057)707-63-12,  
e-mail: zhemerov@gmail.com

*Тугай Дмитрий Васильевич, к.т.н., доц.*  
Харьковская государственная академия городского хозяйства  
кафедра "Теоретическая и общая электротехника"  
61002, Харьков, ул. Революции, 12,  
тел. (057)707-31-11, e-mail: tugai\_d@ukr.net

*Титаренко Игорь Григорьевич, ст. науч. сотрудник*  
Научно-производственное предприятие "ЭОС"  
61158, Харьков, ул. Академика Павлова, 82  
тел./факс: (057)738-04-39,  
e-mail: eos@kharkov.org

*Zhemerov G.G., Tugay D.V., Titarenko I.G.*  
**Simulation of an ac drive system comprising a cascade multilevel voltage inverter.**

A technique for computer modeling of an AC drive system with a cascade multilevel voltage inverter is introduced. With the technique application, a Matlab-model of a variable-frequency electric drive functioning both in a quasi-stationary and in a transition mode is constructed.

**Key words – cascade multilevel inverter, AC drives, Matlab-model, multi-winding transformer, efficiency.**

## ОСОБЕННОСТИ В РАБОТЕ СИСТЕМ ИСТОЧНИКА МОЩНОСТИ – ГЕНЕРАТОРА МНОГОКРАТНЫХ ТОКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

*Проведено аналіз схемних рішень по підключенню інструменту магнітно-імпульсного впливу до джерела потужності. Розкрито особливості побудови системи контролю і управління магнітно-імпульсної установки в режимі багаторазових струмових імпульсів. Наведено опис структурних схем системи контролю та управління.*

*Проведен анализ схемных решений по подключению инструмента магнитно-импульсного воздействия к источнику мощности. Раскрыты особенности построения системы контроля и управления магнитно-импульсной установки в режиме многократных токовых импульсов. Приведено описание структурных схем системы контроля и управления.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Анализ основных достижений и публикаций, постановка задачи.** Классическая функциональная схема магнитно-импульсной установки (МИУ) – источника мощности, как генератора токовых импульсов для оборудования, в технике и технологиях магнитно-импульсной обработке металлов (МИОМ), одними из первых, была описана авторами [1]. Некоторые дополнения, обусловленные модернизацией силовых блоков и обслуживающих систем, несколько позже были отмечены в работе [2]. В качестве устройств для управления зарядом и разрядом емкостного накопителя в классических источниках мощности – МИУ используют электродные разрядники (игнитроны, тиратроны), вакуумные и воздушные трёхэлектродные разрядники (тригatronны) и различные механические двухэлектродные коммутаторы [1, 3].

К коммутирующим устройствам в МИУ предъявляются следующие требования: минимальная собственная индуктивность, малое электрическое сопротивление, способность коммутировать большие токи заданное количество включений, относительная простота конструкции. Но требования стабильности по времени срабатывания и уровню напряжения отсутствуют, ввиду того, что эти характеристики электродных разрядников являются вполне удовлетворительными для работы при высоких напряжениях и в режиме пропускания пусть даже довольно мощных, но одиночных токовых импульсов.

В источниках мощности – генераторах серии токовых импульсов рабочие напряжения достаточно низки, требования к стабильности срабатывания коммутаторов в условиях синхронизированных зарядных и разрядных процессов приобретают особую значимость, существенно возрастает число необходимых переключений в электрических цепях и др.

Существующие источники мощности, как правило, работают в режиме однократного силового воздействия на обрабатываемый объект [4], что не дает возможности контролировать процесс обработки. Они очень громоздкие и поэтому требуются существенные затраты на создание комплекса оборудования в целом. Следует отметить, что МИУ, которые разрабатывались в бывшем СССР (а теперь в России) проектировались на колебательный разрядный импульс (затухающая синусоида) [1, 4], а установки зарубежного производства (США, Израиль, Германия) проектировались на аperiodический разрядный импульс унипо-

лярной формы [5-7]. Данный факт обусловлен различными школами МИОМ и, соответственно, различными технологическими операциями, под которые проектировались конкретные источники мощности.

Все вышеперечисленные факторы ставят первоочередную задачу по выбору коммутаторов, способных стабильно выдерживать большие токи при заданном, причём очень большом, количестве включений и выключений.

Анализ современной специальной периодики показал, что в качестве разрядных ключей вместо высоковольтных коммутаторов целесообразно использовать обычные тиристоры. Но, следует, при этом, учесть и их недостатки. Как показала практика, применяемые по цене и характеристикам тиристоры весьма чувствительны к превышению не только предельного тока, но и скорости его возрастания [3-8].

Так, обеспечение практической дееспособности источника мощности – генератора многократных токовых импульсов в целом требует повышения устойчивости работы коммутаторов, особенно в нештатных ситуациях, возникающих в процессе эксплуатации установки (аварийный режим, короткое замыкание в цепи нагрузки и др.).

Следующая важная задача, это задача создания эффективной системы, объединяющей функции управления, контроля и синхронизации работы основных блоков источника мощности в режиме генерирования серии из последовательности заданного числа токовых импульсов, что, в конечном итоге, даёт возможность управлять процессом силового воздействия на обрабатываемый объект.

**Цель настоящей работы** – анализ схемных решений по подключению инструмента магнитно-импульсного воздействия к источнику мощности. Раскрытие основных особенностей системы контроля и управления для генератора многократных токовых импульсов.

**Альтернативные схемы подключения индукторной системы – инструмента в разрядной цепи.** Рассмотрим некоторые варианты по обеспечению условий безопасной работы элементов разрядного контура (в частности тиристорных коммутаторов, наиболее чувствительных и уязвимых к резким изменениям токов и напряжений) и повышению надёжности работы источника мощности в технике МИОМ.



Речь пойдёт об альтернативных схемах подключения нагрузки – индукторной системы в разрядном контуре, позволяющих формирование токовых импульсов различной временной формы.

Первая из них – это экспоненциально затухающая синусоида [1, 2]. Собственно схема и генерируемый сигнал показаны на рис. 1.

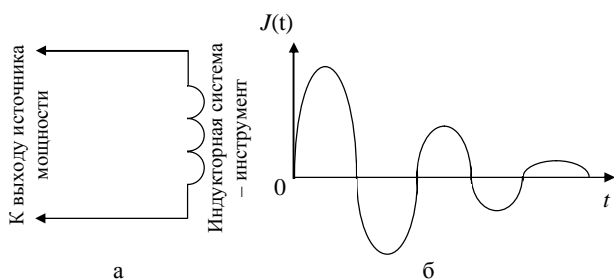


Рис. 1. Непосредственное подключение инструмента – индукторной системы к электрическому выходу источника мощности, а) схема подключения, б) временная форма генерируемого тока

Гармонической форме токового импульса соответствует гармоническая форма напряжения на элементах разрядного контура. Данный факт означает наличие осцилляций во времени относительно нуля. Последнее обстоятельство говорит о том, что амплитуда напряжения на тиристорном переключателе будет принадлежать диапазону  $-U_{m2} \leq U \leq U_{m1}$  ( $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$  – первый и второй максимумы, соответственно), что можно трактовать как почти удвоение действующего сигнала [9].

По той же причине, недостатком колебательного процесса в разрядном контуре является снижение рабочего ресурса конденсаторов в источнике мощности [1, 3, 5, 9].

Избежать этих негативов можно переходом от гармонического к апериодическому токовому импульсу. Отсутствие временных осцилляций в последнем случае означает униполярность генерируемого сигнала. Его формирование можно осуществить с помощью следующих схемных решений по подключению индукторной системы – инструмента к источнику мощности [10].

**Первое** из них – использование выпрямительного моста из силовых диодов рис. 2.

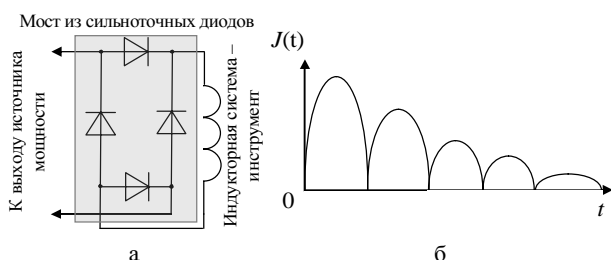


Рис. 2. Формирование униполярного импульса в разрядной цепи с помощью выпрямительного моста, а) схема подключения, б) временная форма генерируемого тока

Достоинство – строгое отсутствие временных осцилляций относительно нуля. Недостаток – необхо-

димость в четырёх силовых диодах.

**Второе** решение предполагает использование силовых диодов для создания собственного контура, замыкающего цепь нагрузки при поступлении отрицательных полуволн разрядного тока (модификация кроу-бар систем), рис. 3 [5, 7, 8].

Достоинство – один силовый диод. Недостаток – появление, пусть небольших, отрицательных относительно нуля значений разрядного тока.

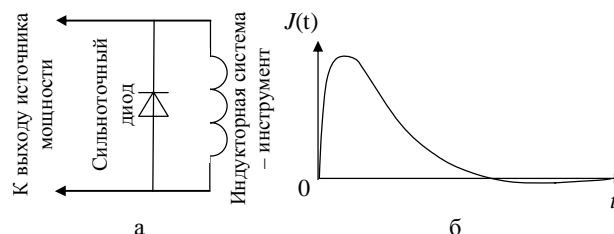


Рис. 3. Формирование униполярного импульса в разрядной цепи с помощью выпрямительного моста, а) схема подключения, б) временная форма генерируемого тока

Вывод: предложенные схемные решения по подключению инструмента метода к источнику мощности позволяют на практике осуществить выбор приемлемого варианта по формированию временной формы разрядного тока, что позволяет повысить надёжность работы всего магнитно-импульсного комплекса при выполнении производственного задания.

**Система контроля и управления.** Предлагаемый источник мощности должен работать в режиме генератора многократных токовых импульсов. Иными словами, он должен поставлять в цепь разряда серию сигналов, количество которых обеспечит, в конечном итоге, управляемость магнитно-импульсного силового воздействия на обрабатываемый объект.

В отличие от известных источников мощности – магнитно-импульсных генераторов силовых диодов, предлагаемый источник мощности обладает той особенностью, которая существенно повышает значимость его систем контроля и управления. Подчеркнём, что они должны не только регулировать уровень заряда емкостных накопителей энергии, но и выполнять множество других функций: синхронизировать процессы «заряд-разряд», устанавливать требуемое число импульсов в серии, отображать текущую информацию о работе источника мощности и др.

Описанные предложения, обоснования и схемные решения по системе контроля и управления, в конечном итоге, позволили создать действующий источник мощности – генератор серий из заданного числа токовых импульсов.

**Структурная схема и назначение.** Система контроля и управления МИУ должна обеспечивать:

- серийный режим генерации разрядных импульсов (от 1 до 100 импульсов);
- управляемый процесс заряда и разряда конденсаторных батарей установки через обмотку индуктора;

- заряд конденсаторных батарей до заданного напряжения в диапазоне от 200 В до 2000 В (шаг 50 В);
- безопасную работу силовых тиристоров в импульсном режиме;
- управление и отображение основных параметров (напряжение заряда, количество циклов, текущее напряжение конденсатора).

Ввиду необходимости выдерживать различные строго заданные временные интервалы, основные функции управления были возложены на микроконтроллер.

Общая структура системы контроля и управления МИУ приведена на рис. 4.

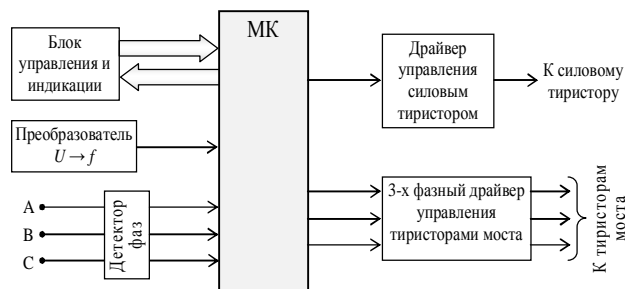


Рис. 4. Структурная схема системы контроля и управления МИУ

Блок управления и индикации обеспечивает интерфейс оператора: возможность управления зарядным напряжением и количеством последовательных циклов, а также отображение текущего напряжения конденсатора.

Непосредственное измерение напряжения на конденсаторе (~2 кВ), даже посредством резистивного делителя, не представляется возможным, поскольку очень высока вероятность выхода из строя аналоговых входов микроконтроллера. Поэтому для реализации функции вольтметра была использована схема преобразователя напряжение-частота.

Преобразователь напряжение-частота относится к классу интегрирующих преобразователей, поэтому обладает соответствующими достоинствами: хорошей точностью при минимальном числе необходимых прецизионных компонентов, низкой стоимостью, высокой помехоустойчивостью, малой чувствительностью к изменениям питающего напряжения, отсутствием дифференциальной нелинейности.

С делителя напряжения сигнал поступает на вход преобразователя напряжение-частота, который на выходе формирует частотный сигнал с пропорциональной частотой. По частоте сигнала микроконтроллер рассчитывает напряжение на конденсаторе и отображает его на индикаторе.

Для формирования сигналов управления тиристорами моста необходимо иметь четкое представление о моментах перехода напряжения через ноль каждой фазы. Детектор фаз представляет собой три схемы фиксации перехода напряжения через ноль, собранные по схеме «звезда». На выходе каждой такой схемы находится компаратор, который формирует цифровой сигнал для микроконтроллера. На основании полученных сигналов микроконтроллер производит отсчет времени, отдельно для каждой фазы, и вы-

рабатывает управляющий сигнал для открытия конкретного тиристора.

Силовые полупроводниковые тиристоры на токи единицы – десятки килоампер имеют достаточно большой размер кристалла (диаметром 30...100 мм), что определяет особенность их работы, особенно когда речь идет об импульсных режимах. Весь протекающий через тиристор ток должен быть, практически мгновенно и равномерно распределён по всей поверхности его кристалла. Иначе локальные неоднородности в структуре полупроводниковых слоев, неизбежно имеющие место в любом полупроводниковом приборе, могут привести к локальным повреждениям структуры тиристора.

Для обеспечения равномерного и быстрого распространения сигнала управления в схеме системы управления были применены специальные схемы драйверов управления тиристорами (рис. 5).

Драйвер формирует импульс тока управления специальной формы со скоростью нарастания не менее 10 А/мкс, что позволяет тиристорному мгновенно переходить в проводящее состояние. Параметры формы импульса тока управления определяются по динамической диаграмме цепи управления конкретного тиристора.

При работе МИУ в разрядном контуре протекают импульсные токи, значение которых достигает десятков килоампер, что негативно влияет на помехозащищенность микроконтроллера и системы управления в целом. Для улучшения этого немаловажного фактора между микроконтроллером и блоками системы была задействована оптронная развязка, а также полная изоляция всех блоков по питанию.

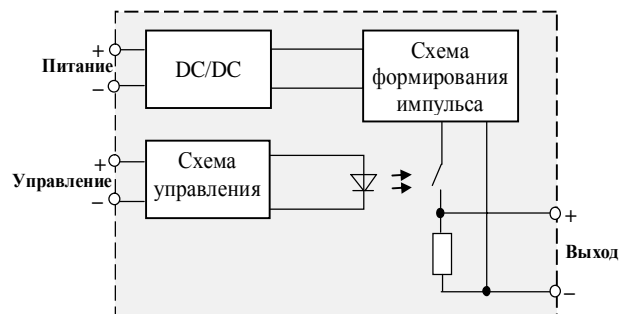


Рис. 5. Структурная схема драйвера управления тиристором

Система контроля и управления МИУ также обеспечивает разряд конденсаторных батарей после прекращения работы или в случае непредвиденных ситуаций (аварийный режим, пропадание питания, обрыв в цепи нагрузки и пр.)

## ВЫВОДЫ

Основные результаты настоящей работы сводятся к следующим положениям.

1. Проведен анализ основных достижений и публикаций по разрядным ключам в источниках мощности – магнитно-импульсных установках
2. Предложенные схемные решения по подключению инструмента магнитно-импульсного воздействия к источнику мощности позволяют на практике осуществить выбор приемлемого варианта по форми-

рованию временной формы разрядного тока, что позволяет повысить надёжность работы всего магнитно-импульсного комплекса при выполнении производственного задания.

3. Предложены, обоснованы и описаны схемные решения по системам контроля и управления, применение которых, в конечном итоге, позволят создать действующий источник мощности – генератор серий из заданного числа токовых импульсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. – Х. : Вища школа, 1977. – 189 с.
2. Батыгин Ю.В. Возможности магнитно-импульсной технологии для рихтовки кузовных элементов автомобилей / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Г.С. Сериков, Е.А. Чаплыгин // Физические и компьютерные технологии, ХНПК "ФЭД", Харьков 2007. – С. 352-355.
3. Магнитно-импульсная обработка металлов. Реферативный сборник Ч.1. – Рижский политехнический институт. – Рига, 1982. – 202 с.
4. Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии для формовки кузовных элементов автомобиля: монография / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 208 с.
5. Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Е. А. Чаплыгин. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 с.
6. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover [Электронный ресурс] – 2009. – Режим доступа: [www.fluxtronic.com](http://www.fluxtronic.com).
7. Welcome to BETAG Innovation [ Электронный ресурс ] – 2012. – Режим доступа: [www.beulentechnik.com](http://www.beulentechnik.com).
8. Гнатов А.В. Магнитно-импульсная установка – источник мощности, обеспечивающий серийный режим генерации разрядных импульсов / А.В. Гнатов, А.М. Дробинин // Вестник ХНАДУ. – Х.: ХНАДУ, 2011. – № 55. – С. 130-134.
9. Ивашин В.В. Конструкция мощного импульсовибрационного источника сейсмических волн (ИСВ) и выбор его основных конструктивных параметров / В.В. Ивашин, И.М. Чуркин // Силовые полупроводниковые и импульсные электромеханические преобразовательные устройства. Сб. статей. – Куйбышев, 1976. – С. 17-24.
10. Пат. 73733 України, В21 Д 26/14. Генератор багаторазових уніполярних імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Аргун Ш.В., Чаплигін Є.О., Дзюбенко О.А., Дробинні О.М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u 2012 02178 заявл. 24.02.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. №19.

**Bibliography (transliterated):** 1. Belyj I.V. Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov / Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. - H. : Vischa shkola, 1977. - 189 s. 2. Batygin Yu.V. Vozmozhnosti magnitno-impul'snoj tehnologii dlya rihтовki kuzovnyh `elementov avtomobilej / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinskij, G.S. Serikov, E.A. Chaplygin // Fizicheskie i komp'yuternye tehnologii, HNPК "F'ED", Har'kov 2007. - S. 352-355. 3. Magnitno-impul'snaya obrabotka metallov. Referativnyj sbornik Ch.1. - Rizhskij politehnicheskij institut. - Riga, 1982. - 202 s. 4. Batygin Yu.V. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnyh tehnologij. Magnitno-impul'snye tehnologii dlya formovki kuzovnyh `elementov avtomobilya: monografiya / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, E.A. Chaplygin. - Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. - 208 s. 5. Batygin Yu.V. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnyh tehnologij. Magnitno-impul'snye tehnologii beskontaktnoj rihтовki kuzovnyh `elementov avtomobilya: monografiya / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, E. A. Chaplygin. - Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 - 242 s. 6. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover [Elektronnij resurs] - 2009. - Rezhim dostupu: [www.fluxtronic.com](http://www.fluxtronic.com) <<http://www.fluxtronic.com/product.php>>. 7. Welcome to BETAG Innovation [ Elektronnij resurs ] - 2012. - Rezhim dostupu: [www.beulentechnik.com](http://www.beulentechnik.com) <<http://www.beulentechnik.com>>. 8. Gnatov A.V. Magnitno-impul'snaya ustanovka - istochnik moschnosti, obespechivayuschij serijnyj rezhim generacii razryadnyh impul'sov / A.V. Gnatov, A.M. Drobiniin // Vestnik HNADU. - H.: HNADU, 2011. - № 55. - S. 130-134. 9. Ivashin V.V. Konstrukciya moschnogo impul'snovibracionnogo istochnika sejsmicheskikh voln (ISV) i vybor ego osnovnykh konstruktivnyh parametrov / V.V. Ivashin, I.M. Churkin // Silovye poluprovodnikovye i impul'snye `elektromehaniicheskie preobrazovatel'nye ustrojstva. Sb. statej. - Kujbyshev, 1976. - S. 17-24. 10. Pat. 73733 Ukraїni, V21 D 26/14. Generator bagatorazovih unipolyarnih impul'siv strumu dlya magnitno-impul'snoi obrobki metaliv / Batigin Yu.V., Gnatov A.V., Argun Sch.V, Chaplygin E.O., Dzyubenko O.A., Drobinni O.M.; zayavnik ta patentovlasnik Harkivsk'ij nac. avtom.-dorozhn. un-t. - № u 2012 02178 zayavl. 24.02.2012; opubl. 10.10.2012, Byul. №19.

Поступила 19.12.2012

*Аргун Щасяна Валиковна,*  
Харьковский национальный  
автомобильно-дорожный университет  
кафедра физики  
61002, Харьков, ул. Петровского, 25  
тел. (057) 700-368-53,  
e-mail: [shasyana@gmail.com](mailto:shasyana@gmail.com)

*Argun Shs.V.*

#### **Working features of power source systems – a multiple current pulse generator.**

An analysis of circuit designs as to connecting a magnetic pulse action tool to a power source has been carried out. Design features of a magnetic pulse installation control and monitoring system in a multiple current pulse mode have been revealed. The description of the control and monitoring system block diagrams has been presented.

**Key words – magnetic-pulse metal working, magnetic pulse installation, monitoring and control system, thyristors, unipolar pulse.**

## ПОЛУЧЕНИЕ СТАНДАРТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*Приведені результати отримання відповідно до вимог міждержавного ГОСТ 1516.2-97 на модернізованому високовольтному устаткуванні експериментального полігону НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ" в двоелектродній повітряній системі "голка-плоскість" стандартних комутаційних аперіодичних імпульсів напруги часової форми 205/1900 мкс амплітудою до 2 МВ.*

*Приведены результаты получения в соответствии с требованиями межгосударственного ГОСТ 1516.2-97 на модернизированном высоковольтном оборудовании экспериментального полигона НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" в двухэлектродной воздушной системе "игла-плоскость" стандартных коммутационных аперіодических импульсов напряжения временной формы 205/1900 мкс амплитудой до 2 МВ.*

### ВВЕДЕНИЕ

При определении электрической прочности изоляции различных электроэнергетических объектов (например, выключателей, разъединителей, высоковольтных вводов, трансформаторов тока, подвесных изоляторов и воздушной изоляции линий электропередачи и др.) сейчас в соответствии с требованиями межгосударственного ГОСТ 1516.2-97 используются генераторы стандартных коммутационных аперіодических импульсов высокого и сверхвысокого напряжения временной формы  $T_{11}/\tau_{11} \approx (250 \pm 50)/(2500 \pm 750)$  мкс, где  $T_{11}$ ,  $\tau_{11}$  – соответственно время подъема импульса напряжения до своей амплитуды  $U_m$  и длительность генерируемого импульса напряжения на уровне  $0,5 \cdot U_m$  [1, 2]. Обычно полярность этих импульсов выбирается положительной, для которой твердая, жидкая и газовая изоляция объектов промышленной электроэнергетики имеет наиболее низкие разрядные электрические градиенты и соответственно пониженную электрическую прочность [2, 3]. Поэтому создание подобного испытательного электрооборудования на высокое и особенно сверхвысокое импульсное напряжение сопряжено с весьма большими техническими трудностями, материальными и финансовыми затратами. При разработке, выборе элементной базы и изготовлении таких генераторов главной трудностью является ослабленная электрическая прочность их собственных изоляционных конструкций, испытывающих воздействие указанного импульсного напряжения микро- и миллисекундного временных диапазонов. Кроме того, требуется отметить, что при проведении натурных испытаний различных объектов электроэнергетики на электрическую прочность их изоляции часто требуются генераторы коммутационных импульсов напряжения указанных амплитудно-временных параметров (АВП) наружной установки.

### 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЗАННОГО ГЕНЕРАТОРА СТАНДАРТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

В НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" в 2012 году был создан и введен в опытную эксплуатацию генератор коммутационных импульсов напряжения (ГКИН), позволяющий проводить в полевых условиях натур-

ные испытания различных объектов электроэнергетики на воздействие стандартных аперіодических импульсов напряжения положительной (отрицательной) полярности временной формы  $T_{11}/\tau_{11} \approx 205/1900$  мкс при их амплитуде  $U_m$  до 2 МВ. Для его создания нами был использован модернизированный генератор импульсных напряжений ГИН-4 этажерочного типа на номинальное напряжение 4 МВ и номинальную запасаемую электрическую энергию 1 МДж (рис. 1) [4, 5], размещенный на открытом воздухе на исследовательско-экспериментальном полигоне НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" (п. Андреевка, Харьковской обл.).



Рис. 1. Общий вид генератора импульсных напряжений ГИН-4 на номинальное напряжение 4 МВ и номинальную запасаемую электрическую энергию 1 МДж, входящего в состав созданного ГКИН на напряжение  $U_m$  до 2 МВ [4, 5]

Все низкоомные зарядные резисторы  $R_3 \approx 500$  Ом в количестве 32 штук электрических цепей всех высоковольтных каскадов генератора ГИН-4 (рис. 2) при этом были заменены на высокоомные, каждый из которых имел активное сопротивление  $R_3 \approx 30$  кОм (рис. 3) [6]. Данный ГКИН, общий вид которого приведен на рис. 4, содержит в своем составе: мощный генератор ГИН-4 с модернизированными зарядными цепями обеих электрических полярностей на постоянное зарядное напряжение  $U_3$  до  $\pm 125$  кВ и собственным разрядным сопротивлением  $R_{P1} \approx 440$  кОм;

© М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, В.И. Кравченко

нагрузочную емкость  $C_H \approx 13,3$  нФ на номинальное импульсное напряжение 3 МВ; формирующий резистор  $R_\phi \approx 4,28$  кОм на номинальное импульсное напряжение 2,5 МВ; дополнительный разрядный резистор  $R_{p1} \approx 32,7$  кОм на номинальное импульсное напряжение 2,5 МВ; токоограничивающий резистор  $R_T \approx 4,59$  кОм на номинальное импульсное напряжение 2,5 МВ; омический делитель импульсного напряжения ОДН-2 собственной разработки на номинальное напряжение 2,5 МВ.

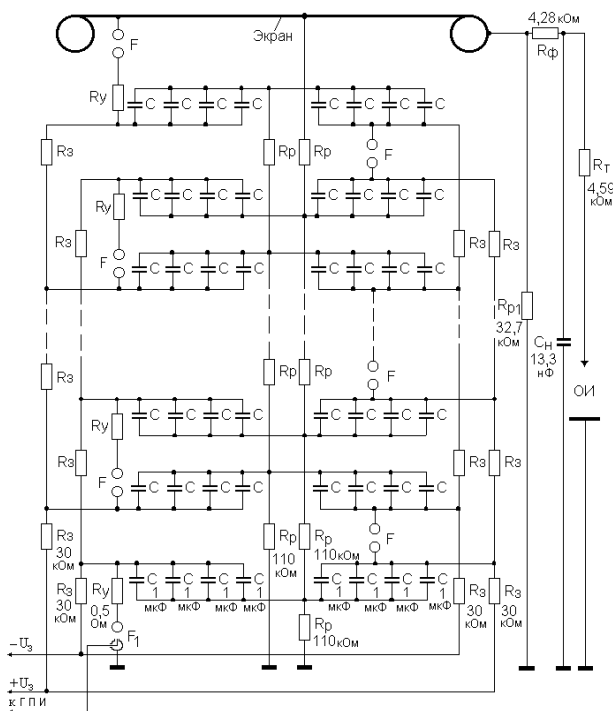


Рис. 2. Электрическая схема замещения модернизированного генератора импульсных напряжений ГИН-4, подсоединенного в схеме формирования стандартных коммутационных аperiodических импульсов напряжения к дополнительному разрядному  $R_{p1} \approx 32,7$  кОм, формирующему  $R_\phi \approx 4,28$  кОм и токоограничивающему  $R_T \approx 4,59$  кОм резисторам, нагрузочной емкости  $C_H \approx 13,3$  нФ и ОИ – двухэлектродной системе "игла-плоскость" с длинным воздушным разрядным промежутком

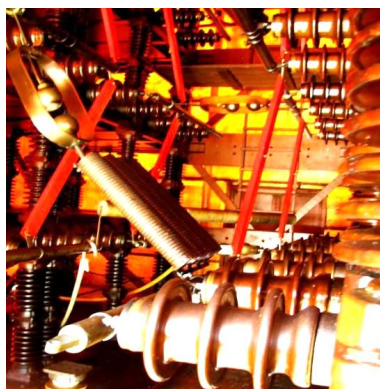


Рис. 3. Общий вид основных элементов модернизированного зарядно-разрядного контура (ЗПК) генератора ГИН-4, содержащего в зарядных цепях положительной и отрицательной полярностей своих высоковольтных каскадов 32 штуки высокоомных резисторов  $R_3 \approx 30$  кОм



Рис. 4. Общий вид генератора для формирования на активно-индуктивной нагрузке стандартного коммутационного аperiodического импульса напряжения временной формы 205/1900 мкс амплитудой  $U_m$  до 2 МВ (слева видна изоляционная опора с нагрузочной емкостью  $C_H \approx 13,3$  нФ, к верхнему потенциальному электроду которой подсоединены формирующий  $R_\phi \approx 4,28$  кОм и токоограничивающий  $R_T \approx 4,59$  кОм резисторы)

На рис. 5 представлена электрическая схема замещения разрядной цепи ГКИН, содержащая активное сопротивление  $R_D \approx 107,3$  кОм высоковольтного плеча омического делителя импульсного напряжения ОДН-2 изготовления НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", подключенного к выбранному нами объекту испытаний (ОИ) – двухэлектродной системе "игла-плоскость" с длинным воздушным разрядным промежутком.

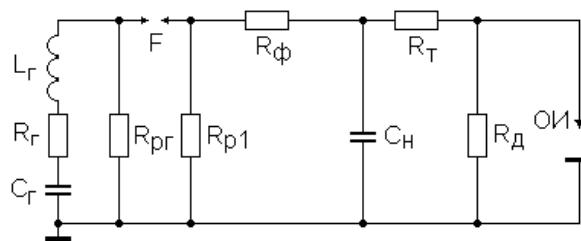


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема замещения разрядной цепи ГКИН, формирующего на ОИ – длинном разрядном воздушном промежутке двухэлектродной системы "игла-плоскость" стандартный коммутационный аperiodический импульс высокого и сверхвысокого напряжения обеих электрических полярностей временной формы  $T_{11}/\tau_{1f} \approx 205/1900$  мкс амплитудой  $U_m$  до 2 МВ

Генератор ГИН-4 согласно схеме на рис. 2 содержит 16 штук высоковольтных каскадов на 250 кВ, каждый из которых имеет восемь импульсных конденсаторов в металлическом корпусе типа КБМГ-125/1 (номинальное напряжение 125 кВ, номинальная емкость 1 мкФ) разработки НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" и один неуправляемый двухэлектродный воздушный шаровой разрядник  $F$  с диаметром электродов 125 мм [4, 5]. Параллельный заряд данных конденсаторов осуществляется от мощного высоковольтного зарядного устройства ГКИН через цепочки зарядных  $R_3 \approx 30$  кОм (в количестве 32 штук) и разряд-

ных  $R_p \approx 110$  кОм (в количестве 16 штук) резисторов на номинальное напряжение до 500 кВ. Каждый из высоковольтных зарядных резисторов  $R_3$  был выполнен на основе последовательно соединенных и залитых эпоксидным компаундом 100 штук объемных графито-керамических резисторов ТВО-5-300 Ом, а каждый разрядный резистор  $R_p$  – из последовательно соединенных и закрепленных на гетинаксовой пластине 50 штук объемных графито-керамических резисторов ТВО-10-2,2 кОм.

Первая секция высоковольтных конденсаторов нижнего этажа генератора ГИН-4 содержала управляемый трехэлектродный воздушный разрядник – тригatron  $F_1$  [7] с диаметром основных шаровых электродов 125 мм, который управляется путем подачи на его управляющий электрод высоковольтного микросекундного импульса напряжения амплитудой до  $\pm 10$  кВ от генератора пусковых импульсов (ГПИ) разработки НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" [8]. Примененный генератор ГИН-4 в разрядной цепи ГКИН характеризуется следующими собственными электрическими параметрами: "емкостью в разряде"  $C_T \approx 0,125$  мкФ; индуктивностью  $L_T \approx 80$  мкГн; активным сопротивлением  $R_T \approx 4,5$  Ом, определяемым последовательно включенными при срабатывании генератора ГИН-4 его девятью успокоительными (демпфирующими) резисторами  $R_V \approx 0,5$  Ом. Изоляционная несущая конструкция генератора ГИН-4 выполнена на основе 576 штук фарфоровых опорных изоляторов КО-400С [4, 5].

Нагрузочная емкость  $C_H \approx 13,3$  нФ разрядной цепи ГКИН выполнена на основе 30 штук последовательно включенных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-100-0,4 (номинальное напряжение 100 кВ, номинальная емкость 0,4 мкФ) [9], которые были размещены на изоляционной опоре высотой 11 м (по 3 штуки на ее каждой из десяти секций), собранной из 52 штук фарфоровых опорных изоляторов ОНС-110/1000 (рис. 6). Формирующий резистор  $R_\phi \approx 4,28$  кОм длиной 8,5 м выполнен из 40 штук последовательно включенных резистивных цепочек, каждая из которых была собрана из двух объемных графито-керамических резисторов ТВО-60 номиналом 51 и 56 Ом. Дополнительный разрядный резистор  $R_{p1} \approx 32,7$  кОм длиной 10 м в нашем случае выполнен из 50 штук последовательно соединенных резистивных цепочек, каждая из которых состоит из двух объемных графито-керамических резисторов ТВО-60 номиналом 100 и 560 Ом. Токоограничивающий резистор  $R_T \approx 4,59$  кОм длиной 9 м, обеспечивающий протекание в разрядной цепи ГКИН при электрическом пробое воздушного промежутка ОИ аperiodического импульса тока амплитудой до 440 А, по аналогии с формирующим резистором  $R_\phi$  был выполнен из 90 штук последовательно включенных объемных графито-керамических резисторов ТВО-60-51 Ом.

Высоковольтное плечо примененного омического делителя импульсного напряжения ОДН-2 (рис. 7) было выполнено на основе девяти последовательно соединенных резистивных секций общей длиной 12,6 м, каждая из которых была изготовлена на основе двух параллельных резистивных цепочек с применением 20 штук объемных графито-керамических резисторов

ТВО-10-2,4 кОм. Измеренное общее активное сопротивление высоковольтного плеча делителя составило  $R_{\Sigma} \approx 107,3$  кОм. Низковольтное плечо нашего омического делителя импульсного напряжения ОДН-2 было выполнено из двух маломощных графито-керамических резисторов ТВО-2-2 Ом с общим активным сопротивлением 4 Ом. При расчетном коэффициенте деления в ОДН-2  $K_{\Sigma} \approx 26825$  с учетом согласованного подключения омического делителя импульсного напряжения ОДН-2 к ОИ и цифровому осциллографу его масштабный коэффициент в проводимых экспериментах был примерно равным  $2K_{\Sigma} \approx 53650$ .



Рис. 6. Общий вид созданной и установленной на существующей изоляционной опоре нагрузочной емкости  $C_H \approx 13,3$  нФ на номинальное импульсное напряжение 3 МВ, примененной в разрядной цепи описываемого ГКИН



Рис. 7. Общий вид делителя ОДН-2 на номинальное напряжение 2,5 МВ, подсоединенного в разрядной цепи ГКИН к двухэлектродной системе "игла-плоскость"

Заметим, что на рис. 7 двухэлектродная система "игла-плоскость" имела воздушный промежуток длиной 3 м. Причем, верхний круглый заостренный стальной электрод  $\varnothing 25$  мм данной двухэлектродной системы был размещен по центру ее нижнего плоского электрода, выполненного из тонкой оцинкованной стали с габаритными размерами  $5 \times 5$  м<sup>2</sup>.

## 2. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛУЧЕНИЯ В РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ СОЗДАННОГО ГКИН КОММУТАЦИОННЫХ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

На рис. 8 приведена осциллограмма полного стандартного коммутационного аperiodического импульса напряжения  $T_{II}/\tau_{II}=205/1900$  мкс положительной полярности при его амплитуде  $U_m \approx 622$  кВ, полученная в разрядной цепи ГКИН на двухэлектродной системе "игла-плоскость" с длиной воздушного промежутка в 3 м (см. рис. 7). При измерении АВП формируемых ГКИН на используемом ОИ импульсов напряжения был применен омический делитель импульсного напряжения ОДН-2 с экранированной кабельной линией передачи полезного электрического сигнала длиной до 60 м и запоминающий цифровой осциллограф Tektronix TDS 1012, размещенный вдали от ГКИН в заглубленном экранированном измерительном бункере.

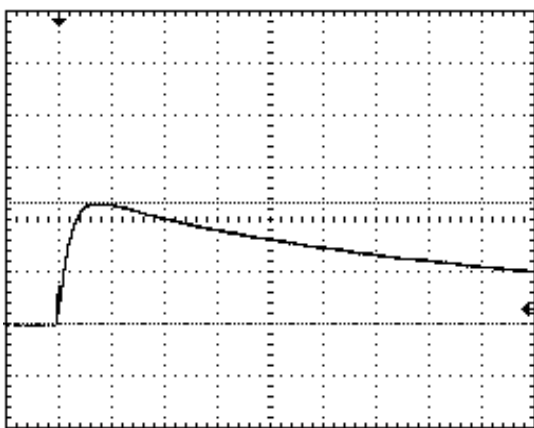


Рис. 8. Осциллограмма полного коммутационного аperiodического импульса напряжения положительной полярности на двухэлектродной системе "игла-плоскость" с длиной воздушного промежутка в 3 м ( $U_3 \approx \pm 32$  кВ;  $U_m \approx 622$  кВ;  $T_{II} \approx 205$  мкс;  $\tau_{II} \approx 1900$  мкс; масштаб по вертикали – 268 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 250 мкс/клетка)

На рис. 9 представлена осциллограмма нарастающей части полного стандартного коммутационного аperiodического импульса напряжения положительной полярности амплитудой  $U_m \approx 966$  кВ ( $T_{II} \approx 205$  мкс) на двухэлектродной системе "игла-плоскость" согласно рис. 7 с длиной воздушного промежутка в 3 м. Из данных рис. 9 следует, что на фронте генерируемого с помощью мощного ГКИН стандартного коммутационного аperiodического импульса сверхвысокого напряжения ( $U_m \approx 966$  кВ) временной формы  $T_{II}/\tau_{II}=205/1900$  мкс наблюдается пикообразный всплеск длительностью до 7 мкс.

Отметим, что этот всплеск напряжения обусловлен особенностями работы генератора ГИН-4 из-за наличия в нем массивного металлического экрана (крыши) площадью до 60 м<sup>2</sup> и быстрого заряда его паразитной емкости от разряда импульсных конденсаторов  $C \approx 1$  мкФ всех каскадов при срабатывании разрядников  $F_1$  и  $F$ , установленных в ЗРК данного генератора импульсных напряжений.

На рис. 10 показана осциллограмма срезанного стандартного коммутационного аperiodического импульса сверхвысокого напряжения положительной по-

лярности при пробое на его нарастающей части воздушного промежутка длиной 3 м в используемой согласно рис. 7 двухэлектродной системе "игла-плоскость". Атмосферный воздух при этом характеризовался следующими зафиксированными параметрами: температурой  $\sim 19$  °С; давлением  $\sim 741$  мм рт. ст.; относительной влажностью  $\sim 76$  %. В этом случае импульсное напряжение среза составляло  $U_c \approx 1030$  кВ, а время среза –  $T_c \approx 110$  мкс. Кроме того, важно отметить, что из-за наличия в разрядной цепи созданного ГКИН высокоомного токоограничивающего резистора  $R_T \approx 4,59$  кОм после электрического среза на промежутке ОИ генерируемого импульса напряжения на его кривой отсутствуют какие-либо колебания (см. рис. 10).

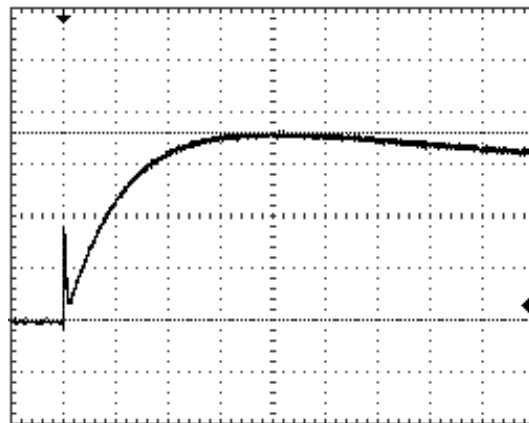


Рис. 9. Осциллограмма нарастающей части полного коммутационного аperiodического импульса напряжения положительной полярности на двухэлектродной системе "игла-плоскость" с длиной воздушного промежутка 3 м ( $U_3 \approx \pm 51$  кВ;  $U_m \approx 966$  кВ;  $T_{II} \approx 205$  мкс; масштаб по вертикали – 268 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

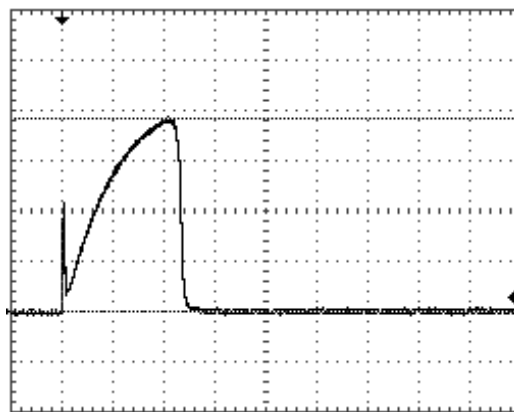


Рис. 10. Осциллограмма срезанного коммутационного аperiodического импульса напряжения положительной полярности при электрическом пробое воздушного промежутка длиной 3 м в двухэлектродной системе "игла-плоскость" ( $U_3 \approx \pm 60$  кВ;  $U_c \approx 1030$  кВ;  $T_c \approx 110$  мкс; масштаб по вертикали – 268 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

### ВЫВОДЫ

В НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" на основе модернизированного сотрудниками отдела №6 генератора ГИН-4 в 2012 году был создан мощный стационарный генератор стандартных коммутационных аperiodических импульсов напряжения положительной (отрица-

тельной) полярности, способный формировать на активно-индуктивной нагрузке испытательные импульсы напряжения временной формы  $T_{II}/\tau_{II} \approx 205/1900$  мкс с амплитудой  $U_m$  до 2 МВ. Данный генератор наружной установки может быть использован для проведения на открытом воздухе натуральных испытаний электрической прочности твердой, жидкой и газовой изоляции основных объектов промышленной электроэнергетики к воздействию на них коммутационных перенапряжений амплитудой от сотен до 2000 кВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межгосударственный стандарт ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. Минск: Изд-во стандартов, 1997. – 31 с.
2. Бейер М., Бёк В., Мёллер К. и др. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы ее применения / Пер. с нем. под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 556 с.
3. ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 32 с.
4. Пекарь И.Р., Фертик С.М. Мощная высоковольтная электроразрядная установка на 4 МВ и 1 МДж // Сб. докл. межвуз. конф.: "Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция". – М.: Энергия, 1970. – С. 22-26.
5. Баранов М.И., Бочаров В.А., Игнатенко Н.Н. и др. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования // Электротехника і електро-механіка. – 2003. – № 2. – С. 75-80.
6. Баранов М.И., Зиньковский В.М., Зябко Ю.П. и др. Влияние зарядных резисторов генератора импульсных напряжений на длительность формируемых на нагрузке аperiodических импульсов сверхвысокого напряжения // Вісник НТУ "ХПИ". Вип. "Техніка та електрофізика високих напруг". Харьков: НТУ "ХПИ", 2012. – № 52 (958). – С. 15-25.
7. Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
8. Бочаров В.А., Пекарь И.Р. Малоиндуктивные генераторы импульсных напряжений // Приборы и техника эксперимента. – 1982. – № 3. – С. 115-117.
9. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н. и др. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mezhsudarstvennyj standart GOST 1516.2-97. `Elektrooborudovanie i `elektrostanovki peremennogo toka na napryazhenie 3 kV i vyshе. Obschie metody ispytaniy `elektricheskoy prochnosti izolyacii. Minsk: Izd-vo standartov, 1997. – 31 s. 2. Bejer M., Bek V., Meller K. i dr. Tehnika vysokih napryazhenij: teoreticheskie i prakticheskie osnovy ee primeneniya / Per. s nem. pod red. V.P. Lari-onova. – M.: `Energoatomizdat, 1989. – 556 s. 3. GOST 17512-82. `El-ektrooborudovanie i `elektrostanovki na napryazhenie 3 kV i vyshе. Metody izmereniya pri ispytaniyah vysokim napryazheniem. – M.: Izd-vo standartov, 1982. – 32 s. 4. Pekar' I.R., Fertik S.M. Moschnaya vysokovol'tnaya `elektrozryadnaya ustanovka na 4 MV i 1 MDzh // Sb. dokl. mezhvuz. konf.: "'Elektrofizicheskaya apparatura i `elektricheskaya izolyaciya". – M.: `Energiya, 1970. – S. 22-26. 5. Baranov M.I., Bocharov V.A., Ignatenko N.N. i dr. Moschnye generatory impul'snyh napryazhenij i tokov predel'nyh parametrov dlya testirovaniya silovogo `elektro`energeticheskogo oborudovaniya // Elektrotehnika i elektromehaniка. – 2003. – № 2. – S. 75-80. 6. Baranov M.I., Zin'kovskij V.M., Zybko Yu.P. i dr. Vliyanie zaryadnyh rezistorov generatora impul'snyh napryazhenij na dlitel'nost' formiruemyh na nagruzke aperiodicheskikh impul'sov sverhvysoкого napryazheniya // Visnik NTU "HPI". Vip. "Tehnika ta elektrofizika visokih naprug". Har'kov: NTU "HPI", 2012. – № 52 (958). – S. 15-25. 7. Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej/ Pod red. V.S. Komel'kova. – M.: Atomizdat, 1970. – 472 s. 8. Bocharov V.A., Pekar' I.R. Maloinduktivnye generatory impul'snyh napryazhenij // Pribory i tehnika `eksperimenta. – 1982. – № 3. – S. 115-117. 9. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevskij M.N. i dr. `Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki: Spravochnik. – M.: `Energoatomizdat, 1987. – 256 s.

Поступила 11.01.2013

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.,  
Колушко Георгий Михайлович, к.т.н., с.н.с.,  
Кравченко Владимир Иванович, д.т.н., проф.  
НИПКИ "Молния"  
Национального технического университета  
"Харьковский политехнический институт".  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47  
тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

*Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I.*  
**Generation of standard switching aperiodic impulses  
of high and superhigh voltage for full-scale tests  
of electrical power objects.**

Results of generation of standard switching aperiodic impulses of 205/1900- $\mu$ s upto-2-MV voltage in a double-electrode "needle-plane" air system are presented. The impulse generation complies with requirements of intergovernmental State Standard 1516.2-97, rebuilt high-voltage equipment of the experimental ground of NTU "KhPI" Reseach & Design Institute "Molniya" used.

**Key words – switching impulses of high and superhigh voltage, full-scale tests, electrical power objects.**



## ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ НА ХВИЛЬОВИЙ ОПІР КООКСІАЛЬНИХ РАДІОЧАСТОТНИХ КАБЕЛІВ

*Коаксіальні абонентські радіочастотні кабелі відносяться до категорії елементів мереж кабельного телебачення, параметри яких значною мірою визначають можливості системи в цілому. Розширення спектру робочих частот кабелів до 1000 МГц, передача цифрових телевізійних сигналів та сигналів мовлення, впровадження телебачення високої чіткості, – все це обумовлює більш жорсткі вимоги до хвильового опору, а значить і до конструкції кабелів. Встановлені норми на відхилення хвильового опору абонентських кабелів не відповідають сучасному стану вимог для надання комплексу якісних інтерактивних послуг. На основі виконаних розрахунків обґрунтовано значення відхилень діаметрів зовнішнього та внутрішнього провідників, а також діелектричної проникності матеріалу ізоляції. Для сучасних абонентських радіочастотних кабелів відхилення хвильового опору від нормованого середнього значення 75 Ом не повинно перевищувати  $\pm 2$  Ом.*

*Коаксиальные абонентские радиочастотные кабели относятся к категории элементов сетей кабельного телевидения, параметры которых существенно определяют возможности системы в целом. Расширение спектра рабочих частот кабелей до 1000 МГц, передача цифровых телевизионных сигналов и сигналов звукового сопровождения, внедрение телевидения высокой четкости, – обуславливают более жесткие требования к волновому сопротивлению, а значит и к конструкции кабелей. Установленные нормы на отклонения волнового сопротивления абонентских кабелей не отвечают современному состоянию требований для предоставления комплекса интерактивных услуг. На основе выполненных расчетов обоснованы значения отклонений диаметров внутреннего и внешнего проводников, а также диэлектрической проницаемости материала изоляции. Для современных абонентских радиочастотных кабелей отклонение волнового сопротивления от нормированного среднего значения 75 Ом не должно превышать  $\pm 2$  Ом.*

### ВСТУП

Інтенсивне впровадження оптичних кабелів в інформаційні мережі ні в якому разі не знімає питання відносно застосування коаксіальних кабелів і, в першу чергу, абонентських. Від цієї кабельної інфраструктури залежить якість отриманих як аналогових, так і цифрових сигналів.

Так, кабельна інфраструктура мереж кабельного телебачення повністю віддзеркалює етапи розвитку технологій кабельного телебачення: від аналогової - до цифрової. Відповідно до цього в мережі впроваджувались все більш досконалі конструкції магістральних кабелів: від коаксіальних – до оптичних. Оптичні кабелі застосовують в якості магістральних, при об'єднанні коаксіальних сегментів, при розвитку додаткових сервісів. Так з'явилася концепція гібридної волоконно-коаксіальної мережі [1].

Водночас перехід до цифрового телебачення накладає також високі вимоги, в першу чергу, до коаксіальної кабельної інфраструктури. Адже цифрове телебачення – інтерактивне, надає можливість перегляду багатьох програм, має підвищену якість прийому. Таким чином, передача цифрових телевізійних сигналів та сигналів мовлення, впровадження телебачення високої чіткості, обумовлюють більш жорсткі вимоги до параметрів передачі, насамперед, до хвильового опору, а значить і до конструкції абонентських радіочастотних кабелів. **Адже ці кабелі відносяться до категорії елементів, параметри яких значною мірою визначають можливості системи в цілому.** Абонентські радіочастотні кабелі повинні забезпечити передачу сигналів в спектрі частот до 1000 МГц. Це, так би мовити, "остання миля" мереж кабельного телебачення. Актуальність розгляду цього питання пов'язана з тим, що кабельні підприємства України випускають такі кабелі.

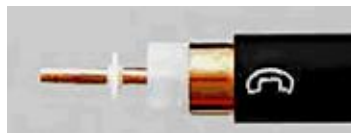
**Метою** статті є обґрунтування допусків на відхилення хвильового опору абонентських

радіочастотних кабелів в процесі виготовлення на основі чисельних розрахунків.

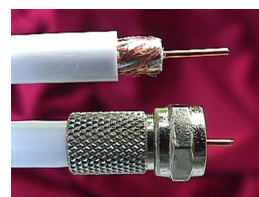
### Коаксіальні радіочастотні кабелі

*Коаксіальні кабелі відносяться до категорії елементів, параметри яких значною мірою визначають можливості системи в цілому.* У зв'язку з цим кабелі повинні мати досить низьке загасання у робочому діапазоні частот, високу однорідність хвильового опору і екранне загасання, механічну міцність і стійкість до впливу навколишнього середовища, високу економічність і технологічність виготовлення [2].

Зазначеним вимогам задовольняє широка номенклатура кабелів, які умовно можна розділити на 3 категорії (табл. 1): магістральні, які використовуються для подачі сигналів від головної станції до субмагістральних ліній (рис. 1,а); розподільчі, які застосовуються в субмагістральних лініях та лініях домових розподільчих мереж; абонентські, які призначені для підключення кінцевих пристроїв (рис. 1,б).



а



б

Рис. 1

В табл. 1 наведені допуски на відхилення значень хвильового опору від номінального 75 Ом. До

числа найбільш важливих параметрів кабелів відносяться загасання екранування, від значення якого залежить відношення сигналу до наведеної перешкоди. Встановлено, що при створенні систем в районах з напруженістю поля 100 мВ/м потрібні кабелі з загасанням екранування не менше 60 дБ.

Таблиця 1

| Категорії кабелів в залежності від загасання                        |   |                                   |
|---|---|-----------------------------------|
| Допустиме загасання $\alpha$ на частоті 200 МГц, дБ/100м, не більше | Допустиме відхилення хвильового опору від номінального значення, Ом | Область застосування              |
| 2,5   | $\pm 2$   | Магістральні лінії                |
| 2,5...4   | $\pm 2$   | Субмагістральні лінії і будинкові |
| 4...8   | $\pm 2,5$   | Розподільчі лінії                 |
| 8...13  | $\pm 3$   | Розподільчі лінії                 |
| 13...21   | $\pm 5$   | Абонентські лінії                 |

### Основні параметри коаксіальних кабелів

Коаксіальні кабелі характеризуються рядом параметрів, які можуть бути розділені на параметри стандартизації, конструктивні, технологічні, електричні, механічні, кліматичні, параметри надійності та якості.

До групи параметрів стандартизації включається марка кабелю, номер технічних умов. Конструктивні параметри – це опис матеріалів, розмірів та маси окремих елементів. До електричних належать первинні і вторинні параметри передачі, параметри екранування [2]. Для радіочастотних коаксіальних кабелів найбільш важливі електричні параметри: хвильовий опір  $Z_0$ , коефіцієнт загасання  $\alpha$ , електричний опір провідників  $R_{KK}$ , електричний опір ізоляції  $R_{I3}$ , електрична ємність  $C_{KK}$  та провідність ізоляції  $G_{KK}$ , індуктивність  $L_{KK}$ , опір зв'язку  $Z_c$ , коефіцієнт відбиття, коефіцієнт стоячої хвилі, нерівномірність частотних характеристик загасання і фази, структурні зворотні втрати (SRL, рис. 2).

Для розрахунку конструкції кабелю, визначення його максимальних можливостей крім діаметра ізоляції і хвильового опору треба знати еквівалентну діелектричну проникність, діаметр внутрішнього провідника (рис. 3).

Вторинні параметри  $Z_0$  – хвильовий опір і коефіцієнт загасання  $\alpha$  – широко використовуються для оцінки експлуатаційних і технічних якостей кабелю. Хвильовий опір – індивідуальна характеристика кабелю, що визначається конструкцією кабелю і матеріалами, які застосовуються при його виготовленні. Ця характеристика визначається первинними параметрами кабелю:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_{KK} + j\omega\omega_{KK}}{G_{I3} + j\omega\omega_{KK}}} \quad \text{Ом.} \quad (1)$$

Оскільки первинні параметри кабелю – частотно-залежні, то хвильовий опір також залежить від частоти. В області високих частот хвильовий опір має активний характер (рис. 4):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_{KK}}{C_{KK}}} \quad (2)$$

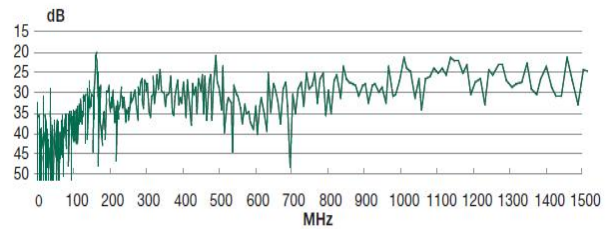


Рис. 2

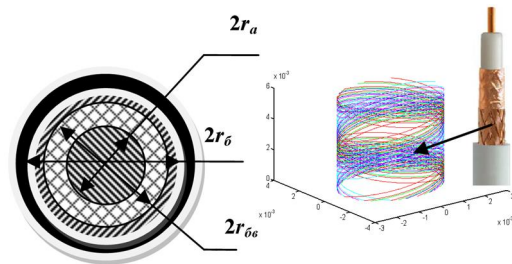


Рис. 3

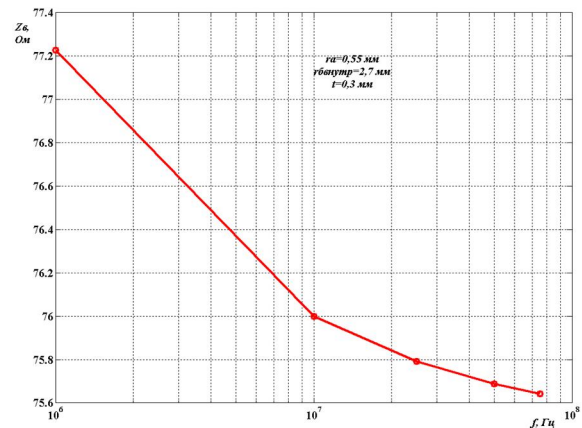


Рис. 4

На рис. 5 наведено розрахункові частотні залежності коефіцієнту загасання (крива 1) в абонентському радіочастотному кабелі з внутрішнім діаметром  $2r_a = 0,72$  мм, діаметром по ізоляції  $2r_b = 3,5$  мм. Провідники – мідні. Крива 3 – втрати в металевих частинах кабелю; криві 3, 1d, 2d, 3d – втрати в діелектрику при різних значеннях відносної діелектричної проникності матеріалу ізоляції та тангенсу кута діелектричних втрат (крива 2 – для суцільної поліетиленової ізоляції, криві 1d та 2d – для спіненої фізичним методом ізоляції на основі поліетилену або фторвмісних кабельних композицій: 50 % та 80 % наповнення азотом відповідно). Таким чином, коефіцієнт загасання залежить від конструкції кабелю, матеріалів провідників, ізоляції. Хвильовий опір – більш загальна характеристика коаксіальних радіочастотних кабелів (дивись табл. 1).

Напевно, що розширення спектру робочих частот кабелів, передача цифрових телевізійних сигналів та сигналів мовлення, впровадження телебачення високої чіткості, – обумовлюють більш жорсткі вимоги до хвильового опору, а значить і до конструкції кабелів [3-4].

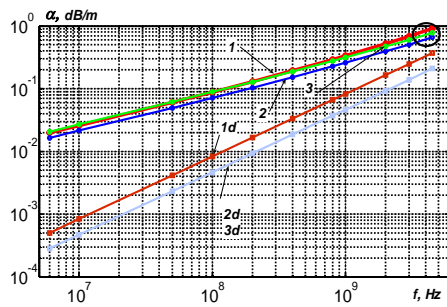


Рис. 5

**Допуски на відхилення хвильового опору абонентських кабелів, які при всіх схемах побудови мереж кабельного телебачення неодмінно залишаються для підключення телевізійних приймачів, повинні бути переглянуті в меншу сторону (дивись табл. 1). Це, так би мовити, "остання миля" мереж кабельного телебачення.**

**Вплив відхилення геометричних розмірів та діелектричної проникності на хвильовий опір радіочастотного кабелю**

Одним із найважливіших факторів при експлуатації коаксіальних радіочастотних кабелів мережі кабельного телебачення є забезпечення якісного прийому цифрових сигналів, спектр яких значно ширший, ніж у аналогових. А це призводить до того, що характеристики однорідності хвильового опору, тобто відхилення від середнього значення, повинні бути меншими.

Відхилення хвильового опору обумовлено, по-перше, якістю провідників та електроізоляційних матеріалів, які застосовуються для виготовлення кабелю, а по-друге, технологічними особливостями, як на стадії виготовлення самого кабелю, так і на стадії монтажу кабельної системи в мережі. В кабелі завжди є відхилення від ідеальної конструкції, які проявляються в відхиленні діаметрів провідників від номінальних значень, провідники розташовуються не строго коаксіально, змінюється форма їх перерізу, діелектрична проникність ізоляції по товщі ізоляції та по довжині кабелю – змінюється. Можливо також розташування провідників з ексцентриситетом, провідники та сама ізоляція мають еліптичну форму. Такі дефекти визначаються як конструктивні неоднорідності. Деформований коаксіальний кабель є неоднорідною лінією, в якій спостерігаються додаткові втрати (рис. 2).

Оцінимо відхилення хвильового опору в залежності від відхилень діаметрів провідників та діелектричної проникності від номінальних значень. Хвильовий опір для височастотного діапазону (формула 2) з урахуванням формул для зовнішньої індуктивності

$$L_{kk} \cong L_{внешн} = \frac{\mu_0 \mu}{\pi} \ln \frac{r_{bp}}{r_a}$$

та робочої ємності

$$C_{kk} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_{экв}}{\ln \frac{r_b}{r_a}}$$

може бути записано у вигляді:

$$Z_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon_e}} \ln \frac{r_b}{r_a}, \quad (3)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – діелектрична стала,  $\epsilon_e$  – еквівалентна відносна діелектрична проникність матеріалу ізоляції,  $\mu$  – магнітна проникність матеріалу провідника (для діаманетиків – міді і парамагнетиків – алюмінію  $\mu=1$ ).

Таким чином, відхилення хвильового опору  $\pm \Delta Z_e$  залежить від відхилення діаметрів зовнішнього  $\pm \Delta(2r_b)$  та внутрішнього  $\pm \Delta(2r_a)$  провідників, а також діелектричної проникності  $\pm \Delta \epsilon_e$ :

$$\Delta Z_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0}} \left( \frac{\Delta r_b}{r_b} - \frac{\Delta r_a}{r_a} - \frac{\Delta \epsilon_e}{2\sqrt{\epsilon_e}} \ln \frac{r_b}{r_a} \right). \quad (4)$$

Відхилення геометричних розмірів та однорідність матеріалу ізоляції, яка визначає флуктуації діелектричної проникності, – випадкові величини з нормальним законом розподілення:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_x}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}},$$

де  $\sigma_x$  – середнє квадратичне відхилення випадкової величини  $x$ , середнє значення якої  $x_0$ .

Середнє квадратичне відхилення хвильового опору, яке залежить від відхилень діаметрів провідників та діелектричної проникності:

$$\sigma_z = \sqrt{\left( \frac{\partial Z_e}{\partial r_b} \right)^2 \sigma_{r_b}^2 + \left( \frac{\partial Z_e}{\partial r_a} \right)^2 \sigma_{r_a}^2 + \left( \frac{\partial Z_e}{\partial \epsilon_e} \right)^2 \sigma_{\epsilon_e}^2}, \quad (5)$$

де  $\sigma$  з відповідними індексами є середнє-квадратичне відхилення діаметрів та діелектричної проникності;

$$\frac{\partial Z_e}{\partial r_b}, \quad \frac{\partial Z_e}{\partial r_a}, \quad \frac{\partial Z_e}{\partial \epsilon_e} \quad \text{– часткові похідні першого}$$

порядку рівняння (4):

$$\frac{\partial Z_e}{\partial r_b} = -\sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon_e}} \frac{1}{r_b}; \quad \frac{\partial Z_e}{\partial r_a} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon_e}} \frac{1}{r_a};$$

$$\frac{\partial Z_e}{\partial \epsilon_e} = -\sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0}} \ln \frac{r_b}{r_a} \cdot \frac{1}{2\epsilon_e \sqrt{\epsilon_e}}.$$

Зв'язок між середнє-квадратичним відхиленням  $\sigma_x$  та самим відхиленням  $\Delta$  випадкової величини  $X$  для отримання в більшій мірі однорідної продукції з меншими відхиленнями від середнього значення в рамках концепції  $6\sigma$  [5]:

$$\sigma_x = \frac{1}{6} \Delta X. \quad (6)$$

Таким чином, відхилення хвильового опору з урахуванням (3) – (6) буде дорівнювати:

$$\Delta Z_e = \sqrt{\left( \frac{\partial Z_e}{\partial r_b} \right)^2 \Delta r_b^2 + \left( \frac{\partial Z_e}{\partial r_a} \right)^2 \Delta r_a^2 + \left( \frac{\partial Z_e}{\partial \epsilon_e} \right)^2 \Delta \epsilon_e^2}. \quad (7)$$

На рис. 6-9 наведені результати розрахунків відхилення хвильового опору радіочастотного кабелю при варіаціях діаметру внутрішнього, зовнішнього провідників та діелектричної проникності.

Для забезпечення відхилення хвильового опору на рівні  $\pm 2$  Ом відхилення внутрішнього провідника не повинно перевищувати  $\pm 0,0125$  мм (рис. 6); відхилення по діаметру ізоляції –  $\pm 0,020$  мм (рис. 7); діелектричної проникності –  $\pm 0,03$  (рис.9).

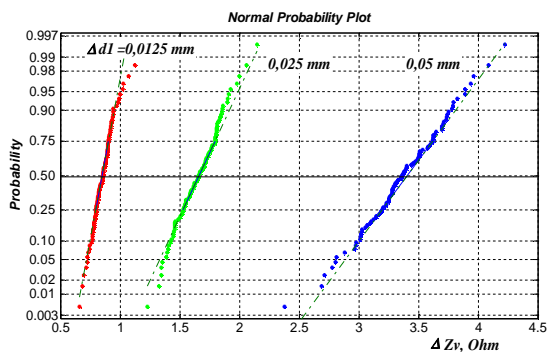


Рис. 6. Інтегральні функції розподілу відхилень хвильового опору при варіаціях внутрішнього діаметру  $\Delta(2r_a)$  від номінальних значень

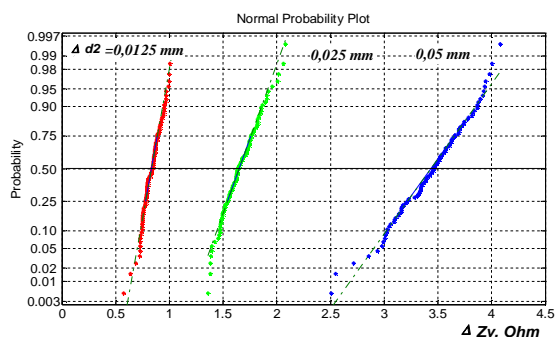


Рис. 7. Вплив варіацій діаметру по ізоляції  $\pm\Delta(2r_o)$  на відхилення хвильового опору

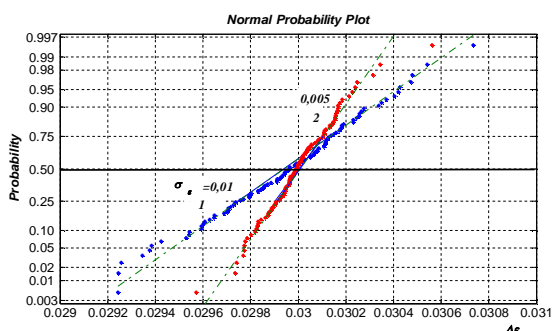


Рис. 8. Інтегральні функції розподілу відхилень еквівалентної діелектричної проникності  $\pm\Delta\epsilon_e$  від номінальних значень

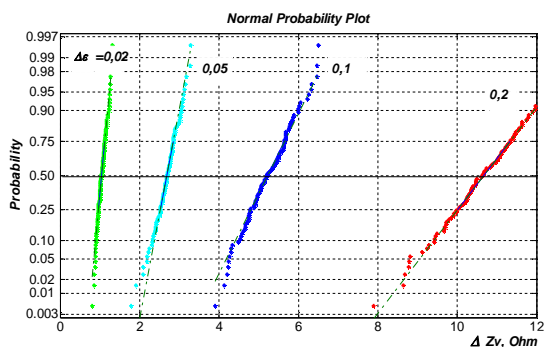


Рис. 9. Інтегральні функції розподілу відхилень хвильового опору при варіаціях еквівалентної діелектричної проникності

Для забезпечення більш жорсткої конструкції кабелю необхідно застосовувати систему підігріву жили, що сприяє поліпшенню адгезії тонкого суцільного шару ізоляції, який наноситься на внутрішній провідник при екструзії тришарової ізоляції [6]. Ізоляція кабелів виконується трьохшаровою: суцільний прошарок товщиною 10 мкм, який накладається на провідник; спінений та зовнішній суцільний прошарок товщиною 50 мкм [7].

Пристрій для підігріву в комплекті з мікропроцесорною системою встановлюється перед екструдером та підігріває провідник за допомогою індукційного нагріву. Ця система відображає параметри екструзії в графічному та цифровому вигляді на 8,4" TFT моніторі [8].

На рис. 10 наведено розрахункові криві розподілу температури по товщі ізоляції в різні моменти часу ( $i$  – номер прошарку по товщі ізоляції, починаючи з жили) при виході ізолюваного внутрішнього провідника з екструдера без системи підігріву жили (рис. 10, а, рис. 11) та з підігрівом (рис. 10, б-в). Порівняння режимів водяного охолодження показує, що при наявності підігріву жили твердіння ізоляції – більш рівномірне при температурі жили  $55$  °С (рис. 10.б). Процес починається з поверхні ізоляції, температура якої близька температурі прошарків біля жили. Це запобігає утворенню твердої корки, яка може потягнути на себе ще рідкий діелектрик в глибині ізоляції. І, як результат, унеможливує утворення повітряного прошарку біля жили (порівняйте верхні криві рис. 10, а-в)

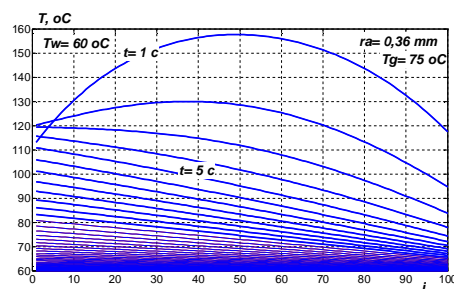
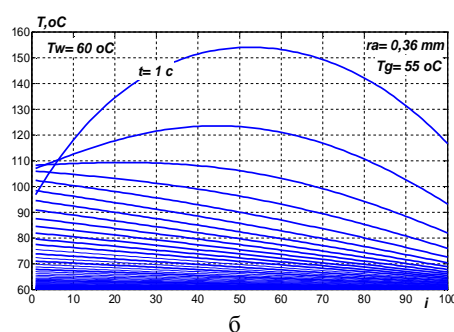
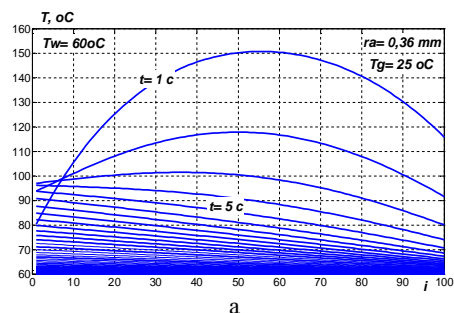


Рис. 10



Рис. 11

### ВИСНОВКИ

Таким чином, впровадження гібридних оптико-коаксіальних мереж кабельного телебачення дозволяє надавати абонентам стандартні аналогові та цифрові канали телебачення, розширений сервіс. І, як наслідок, спектр робочих частот кабелів розширюється. Це накладає більш жорсткі вимоги до коаксіальної кабельної інфраструктури, насамперед, найбільш "слабкого" ланцюга в такій мережі, яким є абонентський радіочастотний кабель. Встановлені норми на відхилення хвильового опору абонентських кабелів не відповідають сучасному стану вимог для надання комплексу якісних інтерактивних послуг.

Однорідність хвильового опору знаходиться в прямій залежності від допусків на конструктивні елементи кабелю. На основі виконаних розрахунків обґрунтовано значення відхилень діаметрів зовнішнього  $\pm\Delta(2r_0)$  та внутрішнього  $\pm\Delta(2r_1)$  провідників, а також діелектричної проникності  $\pm\Delta\epsilon_c$  абонентського радіочастотного кабелю.

Для сучасних абонентських радіочастотних кабелів відхилення  $\pm\Delta Z_c$  хвильового опору від нормованого значення 75 Ом не повинно перевищувати  $\pm 2$  Ом. Забезпечити це можливо завдяки сучасним системам контролю за технологією виготовлення та застосуванню системи підігріву внутрішнього провідника при екструзії трьохшарової ізоляції. Це призводить до підвищення адгезії тонкого суцільного шару ізоляції, який безпосередньо накладається на провідник. В результаті забезпечується більш жорстка конструкція кабелю.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зима З.А. Системы кабельного телевидения / З.А. Зима, И.А. Колпаков, А.Б. Романов, М.Ф. Тьютин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 616 с.
2. Гальперович Д.Я. Радиочастотные кабели / Д.Я. Гальперович, А.А. Павлов, Н.Н. Хренков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
3. Безпрозванных Г.В. Вплив ексцентриситету на напруженість електричного поля в кабелях коаксіальної конструкції / Г.В. Безпрозванных, І.А. Морозов, О.Г. Кессаєв // – Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, освіта, здоров'я". – Харків: НТУ "ХПІ", 2012.
4. Безпрозванных А.В. Оценка параметров передачи коаксиального кабеля снижения в процессе эксплуатации / А.В. Безпрозванных, Дармориз А.С., Ляшенко О.И. // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – № 7.

5. Pande, Peter S.; Neuman, Robert P.; Gavanagh, Roland R. The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies Are Honing The Performans. – N.Y.: McGraw-Hill, 200 – 282p.
6. Беспрозванных А.В. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций / А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока // Навчальний посібник. – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – 108 с.
7. Бойко А.М. Обґрунтування товщини ізоляції витих екранованих пар структурованих кабельних систем / А.М. Бойко, Г.В. Безпрозванных // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – Т.1, вип. 2. – С. 22-30.
8. Електронний ресурс: [www.SIKORA.com](http://www.SIKORA.com).

**Bibliography (transliterated):** 1. Zima Z.A. Sistemy kabel'nogo teledeniya / Z.A. Zima, I.A. Kolpakov, A.B. Romanov, M.F. Tyutin. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2007. – 616 s. 2. Gal'perovich D.Ya. Radiochastotnye kabeli / D.Ya. Gal'perovich, A.A. Pavlov, N.N. Hrenkov. – M.: 'Energoatomizdat, 1990. – 256 s. 3. Bezprozvannih G.V. Vpliv ekscentrisiteta na napruzenist' elektrichnogo polya v kabelyah koaksial'noi konstrukcii / G.V. Bezprozvannih, I.A. Morozov, O.G. Kessaev // – Tezi dopovidej XX mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferencii "Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, osvita, zdorov'ya". – Harkiv: NTU "HPI", 2012. 4. Besprozvannyh A.V. Ocenka parametrov peredachi koaksial'nogo kabelya snizheniya v processe `ekspluatacii / A.V. Besprozvannyh, Darmoriz A.S., Lyashenko O.I. // Visnik NTU "HPI". – Harkiv: NTU "HPI", 2006. – № 7. 5. Pande, Peter S.; Neuman, Robert P.; Gavanagh, Roland R. The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies Are Honing The Performans. – N.Y.: McGraw-Hill, 200 – 282p. 6. Besprozvannyh A.V. Matematicheskie modeli i metody rascheta `elektroizolyacionnyh konstrukcij / A.V. Besprozvannyh, B.G. Naboka // Navchal'nij posibnik. – Harkiv: NTU "HPI", 2012. – 108 s. 7. Boyko A.M. Obruntuvannya tovshchiny izolyacii vitih ekranovanih par strukturovanih kabel'nih sistem / A.M. Boyko, G.V. Bezprozvannih // Visnik NTU "HPI". – 2011. – Т.1, vip. 2. – S. 22-30. 8. Elektronnij resurs: [www.SIKORA.com](http://www.SIKORA.com).

Поступила 10.12.2012

Безпрозванных Ганна Вікторова, д.т.н., проф.,  
Бойко А.М., Кессаєв О.Г.

Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"  
кафедра електроізоляційної та кабельної техніки  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 707-60-10, e-mail: [bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua](mailto:bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua)

Bezprozvannyh G.V., Boyko A.M., Kessaev O.G.

### Influence of constructive and technological defects on coaxial radio-frequency cable impedance.

Coaxial user's radio-frequency cables belong to a category of cable television network elements parameters of which essentially specify the system capabilities as a whole. The cable working frequency spectrum spreading to 1000 MHz along with digital television and soundtrack signals transmission and high-definition television introduction causes more rigid requirements for wave impedance and, consequently, for the cable design. The established norms on user's cable impedance deviations fail to answer the state-of-the-art requirements for granting a complex of interactive services. On the basis of calculations performed, values of internal and external conductor diameters deviations as well as dielectric permeability of the insulation material are validated. For up-to-date user's radio-frequency cables, the impedance deviation from the normalized average value of 75 Ohm should not exceed  $\pm 2$  Ohm.

**Key words** – coaxial cables, impedance, constructive and technological defects, diameter deviation, dielectric permeability deviation.

## НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В МИОМ, СВЯЗАННОЕ С ПРИТЯЖЕНИЕМ ТОНКОСТЕННЫХ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ. ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

*У рамках статті проведено короткий огляд основних світових досягнень нового напрямку магнітно-імпульсної обробки металів, пов'язаного з притяганням заданих ділянок листових металів при виробництві та ремонті транспортних засобів. Дано обґрунтування актуальності розвитку даного нового напрямку і розкриті його основні періоджерела. Висвітлено альтернативні методи рихтування пошкоджених листових металів.*

*В рамках статті проведено короткий огляд основних світових досягнень нового напрямку магнітно-імпульсної обробки металів, пов'язаного з притяганням заданих ділянок листових металів при виробництві та ремонті транспортних засобів. Дано обґрунтування актуальності розвитку даного нового напрямку і розкриті його основні періоджерела. Висвітлено альтернативні методи рихтування пошкоджених листових металів.*

### ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени разработки разного рода технических систем для выравнивания заданных участков на поверхности тонкостенных листовых металлов инициированы, в основном, спросом на производственные операции по реставрации корпусов самолётов и кузовных покрытий наземных транспортных средств, в частности автомобилей [1-3].

В первом случае необходимость такой операции обусловлена нарушением аэродинамических характеристик летательного аппарата, вплоть до потери устойчивости в полёте, во втором, не только эстетическими соображениями, и невозможностью дальнейшей эксплуатации транспортного средства с повреждённым кузовом.

Как показывает практика, более 50% повреждённый представляют собой вмятины в зонах с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом. Это различные корпусные элементы, крылья, фюзеляжи самолётов. Это двери, капоты, крыши, пороги, бампера автомобилей т.д.

В этой связи особый интерес представляют устройства, позволяющие производить реставрацию повреждённых (вмятин) на поверхности с внешней стороны без разборки корпуса или кузова и, по возможности, без нарушения существующего защитного покрытия [3, 4].

Достоверность вышесказанного не требует подтверждения специальными ссылками на первоисточники. Доказательством тому являются хорошо известные не только специалистам разработки концерна "Boeing Company", внедряемые в авиапромышленность США в течение уже последних 40 лет, а также европейских фирм (с многочисленными филиалами по всему миру), специализирующихся на эффективном оборудовании для ремонта современных автомобилей.

**Цель настоящей работы** – обоснование актуальности развития магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) в направлении, связанном с притяжением заданных участков листовых металлов при производстве и ремонте транспортных средств, краткий обзор основных мировых достижений в этой области.

### ПЕРВОИСТОЧНИКИ НОВОГО НАПРАВЛЕНИЯ МИОМ

Исторически и хронологически, "пионером" в области создания технических систем для внешнего устранения вмятин в листовых проводниках можно считать Соединённые Штаты Америки [5-13]. Но идея использования энергии импульсных магнитных полей

для производственных целей, первым была высказана советским академиком Капицей П.Л. в 1920 г. Он впервые обратил внимание научной общественности на появление мощных электродинамических сил в электротехнических установках, которые в то время использовались для исследований физических свойств материалов при воздействии сильных электромагнитных полей [14-16].

Одно из первых, и без преувеличения можно сказать основополагающих, предложений по созданию устройств магнитно-импульсного притяжения металлов было сформулировано в патенте Н. Furth [5].

Рассматривалось два варианта решения проблемы (рис. 1).

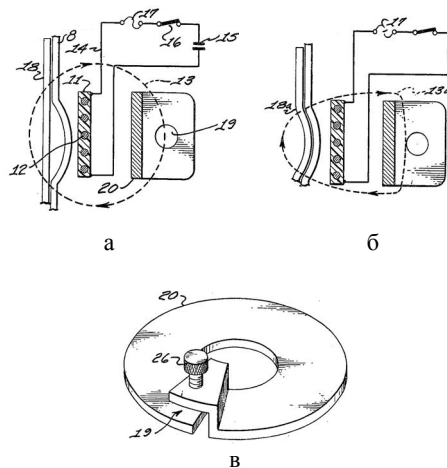


Рис. 1. Общий вид схемы изобретения Н. Furth: а – до перегорания плавкой вставки; б – после перегорания плавкой вставки; в – общий вид вторичной катушки

Первый, помимо основного многовиткового соленоида, предполагал введение дополнительного разомкнутого витка (рис. 1,в), размещённого над вмятиной в тонком металлическом листе. По замыслу автора, основным соленоидом возбуждается медленно нарастающее магнитное поле и при определённой разности потенциалов на границах разреза в разомкнутом витке, должен произойти электрический пробой промежутка, после чего виток становится короткозамкнутым. Протекающий в нём ток возбуждает быстро нарастающее магнитное поле, направление которого противоположно полю основного соленоида. Поле витка и поле соленоида взаимно уничтожа-

ются. Поверх металла с вмятиной результирующая напряжённость обращается в нуль. Поле основного соленоида, проникшее и оставшееся под обрабатываемым металлом, создаёт давление, направленное к индуктору. Под его действием происходит выравнивание деформированного металла.

Физическая сущность данного предложения сводится к возбуждению магнитных полей с разными временными характеристиками. "Медленное" проникает сквозь обрабатываемый объект – тонкий листовый проводник. "Быстрое" не может проникнуть, его назначение состоит в том, чтобы уничтожить поле над листом с вмятиной. В результате "медленное" магнитное поле реализует магнитно-импульсное притяжение обрабатываемого металла к индуктору.

Второй вариант по физической сущности не отличается от первого предложения. Различие состоит в способе получения "медленного" и "быстрого" полей. Здесь автор предлагает использовать два отдельных источника мощности (батареи импульсных конденсаторов) с разными временными характеристиками генерируемых токов. Взаимодействие возбуждаемых полей в зоне обработки приводит к превалированию сил магнитного давления на металл снизу над давлением сверху. Объект обработки притягивается к индуктору.

Работоспособность возможных технических реализаций по предложениям Н. Furth весьма сомнительна. Как следствие, его патент не нашёл своего практического воплощения, хотя авторы следующих более поздних и более удачных проектов ссылаются на него, как на первоисточник в направлении развития систем для магнитно-импульсного притяжения.

К таковым относятся, например, изобретения инженеров "Boeing Company" К. Hansen, I. Hendrickson, Р. Zieve и др. [6-9]. Следует подчеркнуть, что физическая сущность цитируемых разработок принципиально не отличается от физической сущности заявки Н. Furth. Здесь также речь идёт о суперпозиции "медленного" и "быстрого" полей. Но теперь уже авторы говорят о наложении низкочастотного и высокочастотного сигналов в обмотке инструментального индуктора.

Двухчастотные системы для магнитно-импульсного притяжения нашли реальное практическое применение в работах по реставрации корпусов самолётов, рис. 2. В последующем на базе этих разработок из корпорации "Boeing Company" выделились фирмы "Electroimpact" и "Fluxtronic" (США), специализирующиеся именно на магнитно-импульсных технологиях по притяжению металлов [10, 11].



Рис. 2 Системы магнитно-импульсного устранения вмятин в элементах летательных аппаратов: а – разработка фирмы "Electroimpact"; б – оборудование, предлагаемое компанией "Fluxtronic"

Общими недостатками систем магнитно-импульсного притяжения, основанных на суперпозиции низкой и высокой частот (как токов, так и полей), являются:

- наличие двух источников энергии (магнитно-импульсных установок);
- сложность необходимой высоковольтной электроники;
- большие затраты на требуемые комплектующие (как минимум в 2 раза больше в сравнении с традиционными магнитно-импульсными системами);
- низкая надёжность в эксплуатации плюс достаточно высокая себестоимость конечного продукта.

#### АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ РИХТОВКИ

В заключение обзора работ американских учёных по реставрации повреждённых металлов для полноты картины следует упомянуть разработки, не связанные с использованием магнитно-импульсных технологий и по разным, но по вполне объективным причинам, не нашедшие своего практического применения.

Так, в [17, 18] описан способ удаления вмятин с помощью магнита (электромагнита). Суть данного способа заключается в том, что к месту с вмятиной на металле подносят магнит (электромагнит), а с противоположной стороны (с обратной стороны поврежденного участка листового металла) подносят металлический объект (шарик, ролик, массивную металлическую подложку) который обладает хорошими магнитными свойствами. Магнит, притягивая металлический объект, удаляет вмятину. В патенте [19] предложен комплекс по удалению вмятин с кузовов автомобилей, в основу которого положено совмещение гидравлики с электромагнитом. В патентах [20] описан пневматический способ и оборудование для удаления вмятин с кузовов авто. Вакуумный способ удаления вмятин описан в патенте [13], (рис. 3), а в монографии [4] авторы описывают способ удаления вмятин с помощью интенсивного нагрева и последующим резким охлаждением участка, где находится вмятина (рис. 4). Авторы патента [21] описывают способ с "прямого пропускания" тока через обрабатываемый металл, принцип действия которого основан на взаимодействии параллельных проводников с токами (закон Ампера), в результате, проводники с одинаково направленными токами притягиваются друг к другу, что и лежит в основе устранения деформаций, и др.

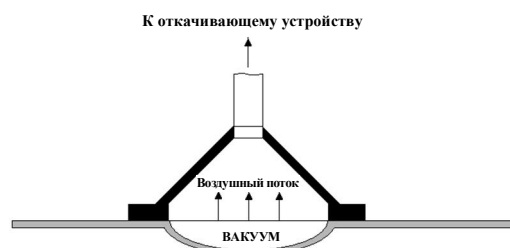


Рис. 3. Схема производственной операции по вакуумному устранению вмятин с поверхности листовых металлов



Рис. 4. Схема производственной операции по устранению вмятин с помощью её интенсивного нагрева и последующего резкого охлаждения

На европейском рынке оборудования для рихтовки и восстановления автомобильных кузовов лидирующее положение занимает концерн "Beulentechnik AG" (главный офис в Швейцарии, филиалы в Германии, Чехии, Австралии) [22-28].

В перечне предлагаемых разработок содержится довольно обширный ряд механических устройств для внешней рихтовки вмятин [22-25]. Среди них выделяются вытяжные приспособления, общими конструктивными элементами которых являются собственно вытягивающий элемент – стержень, одним концом приваренный или приклеенный к металлу по центру удаляемой вмятины, и рычажный механизм, позволяющий постепенное вытягивание свободного конца стержня до уровня реставрируемой поверхности, рис. 5.

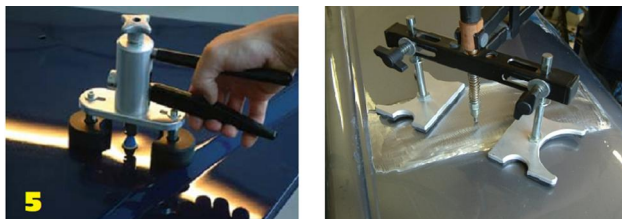


Рис. 5. Механические вытяжные устройства для внешнего устранения вмятин концерна "Beulentechnik AG"

После устранения вмятины сварное или клеевое присоединение убирается. Отреставрированная поверхность подвергается обработке в соответствии с традиционной технологией. Последняя операция – это нанесение защитного лакокрасочного покрытия.

Следует подчеркнуть, что работа с механическими вытяжными устройствами требует высокой квалификации и мастерства исполнителя. Но даже в этом случае практически невозможно обеспечить достаточную надёжность выполняемой операции в смысле сохранности ремонтируемого элемента. Последнее замечание означает, что в процессе реставрации возможно и его разрушение.

#### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ МИОМ ДЛЯ РЕМОНТА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Значительно более интересными для практики внешнего устранения вмятин в автомобильных кузовах из ферромагнитных сплавов представляются предложения концерна "Beulentechnik AG", названные как "Магнитное приспособление для удаления вмятин", рис. 6 (в оригинале на сайте концерна – "Magnetic Dent Remover") [26-28].

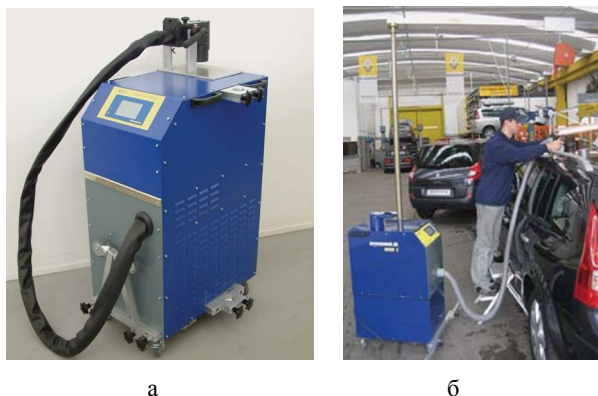


Рис. 6. Магнитное приспособление для удаления вмятин концерна "Beulentechnik AG": а – источник мощности с инструментом; б – приспособление в действии

В патентах [26, 27], полученных в разное время (2006 г., автор – R. Meichtry, 2008 г., авторы – R. Meichtry и I. Kouba), практически, заявлены одни и те же позиции.

В целом, это устройство для удаления вмятин в листовых ферромагнетиках, содержащее ёмкостные накопители энергии, рабочий инструмент и, так называемые, адаптерные приспособления, предназначенные для фиксации рабочего инструмента над удаляемой вмятиной.

Существенной практической новизной здесь обладают лишь способ изготовления многовитковой рабочей катушки инструмента-индуктора и адаптерные приспособления.

Выносной индуктор – это мобильный инструмент, подсоединённый к источнику мощности гибким кабелем, описан в патенте [27].

Принцип магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов в патентах [26, 27] заимствован из работ, часть из которых была выполнена по заказу концерна "Beulentechnik AG" в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" (НТУ "ХПИ") в 2002-2003г.г. [29-31].

Главным фактором, обеспечивающим трансформацию известного отталкивания обрабатываемого объекта в притяжение, то есть, обеспечивающим работоспособность систем, названных в цитируемых патентах как "Магнитное приспособление для удаления вмятин", является выбор рабочих частот действующего поля. Эффект возможен только в низкочастотном режиме, когда:

$$\omega \ll \frac{1}{\mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2},$$

где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – рабочая частота,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\gamma$  – удельная электропроводность металла,  $d$  – толщина металла.

Условие низкочастотного режима в виде процитированного неравенства выписано из работы [31], опубликованной в 2004 г. Оно же зафиксировано в патенте [32] с приоритетом от 2004 г. Эта же формула, регламентирующая выбор частотного диапазона действующих полей и обозначенная как (уравнение 2), фигурирует в патентах R. Meichtry и I. Kouba [26, 27].

В настоящее время "Магнитное приспособление для удаления вмятин" так же, как и широкий перечень механических приспособлений, предлагаются авторемонтным компаниям концерном "Beulentechnik AG" на страницах их фирменного сайта [28].

К преимуществам магнитно-импульсных разработок концерна "Beulentechnik AG" в сравнении с реальными аналогами, предлагаемыми американскими производителями "Boeing Company", "Electroimpact" и "Fluxtronic" (США), следует отнести:

- наличие одного источника мощности вместо двух;
- отсутствие сложной высокоточной электроники, необходимой для синхронизации в случае двух источников;
- существенно меньший перечень комплектующих и, наконец, вероятно значительно меньшая себестоимость готового изделия.

К основным недостаткам оборудования "Магнитное приспособление для удаления вмятин" кон-



церна "Beulentechnik AG" следует отнести:

- применение в качестве инструмента многовитковой катушки, которая, судя по описанию в цитируемых патентах, достаточно сложна в изготовлении и, как показал весь практический опыт МИОМ, весьма недолговечна в эксплуатации;

- возможность работы только с ферромагнетиками (отдельные стальные композиции), и невозможность устранения вмятин в немагнитных металлах (алюминиевые сплавы и др.);

- принцип действия основан на устаревших к настоящему времени выводах первых научно-исследовательских поисковых работ 2003-2004 гг., которые не позволяют в достаточной мере реализовать все позитивные возможности магнитно-импульсного притяжения (в дальнейшем будут освещены более эффективные предложения – следствия авторских исследований электрофизической природы протекающих электромагнитных процессов).

Проблема притяжения заданных участков листовых металлов с помощью силового воздействия со стороны электромагнитных полей может быть решена и с использованием других технических предложений, выдвинутых в разное время разными авторами.

Познавательный интерес представляют различные вариации способа, описанного в монографии Г.А. Шнерсона [33], и заключающегося в создании медленно нарастающего магнитного поля, резко прерываемого при достижении заданного уровня напряженности. В результате над обрабатываемым объектом поля нет, а под ним есть (проникающее). Возникающие электродинамические усилия притягивают к индуктору заданный участок металла, вызывая его деформирование. Несмотря на кажущуюся "прозрачность" данного предложения, информация о каких-либо его практических реализациях в научной периодике отсутствует.

Следует отметить, что физическая сущность медленного нарастания с последующим прерыванием действующего магнитного поля сводится к принципу действия двухчастотных магнитно-импульсных систем, предложенных и создаваемых до настоящего времени американскими производителями соответствующей аппаратуры.

Работы по созданию оборудования и инструментов для магнитно-импульсного притяжения, основанных на иных физических концепциях, были начаты в Национальном техническом университете НТУ "ХПИ". В настоящее время эти работы продолжены и ведутся также в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете (ХНАДУ), где при кафедре физики создана специализированная научно-исследовательская лаборатория электромагнитных технологий [34-38].

Первые разработки устройств магнитно-импульсного притяжения были основаны на создании пространственно-временного распределения действующих полей в индукторной системе, обеспечивающего нуль магнитного потока в пространстве между тонкостенными листовыми металлами. Инструменты такого принципа действия были названы авторами предложения "сложными индукторными системами". Сущность предложения состоит в следующем. Между двумя источниками магнитного поля (например, плоскими соленооидами) помещаются два листовых металла. Варьирование амплитуд внешних полей в соответствии с

электрофизическими характеристиками металлов позволяет получить нуль магнитного потока в пространстве между ними. За счёт сил давления, действующих со стороны соленоидов, листовые металлы испытывают взаимное притяжение [29].

Для расширения круга производственных задач, требующих выноса инструмента к обрабатываемым объектам, была создана магнитно-импульсная установка с выносным индуктором. Данная разработка была защищена патентом 1996 года [30].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных процессов в "сложных индукторных системах" описаны в публикациях [29, 30].

Резюмируя первые попытки трансформировать естественное магнитно-импульсное отталкивание в "искусственное" притяжение с помощью "сложных индукторных систем", следует отметить, что, как инструменты для притяжения, они не нашли практического применения. Их использование оказалось целесообразным для штамповки рисунка печатных плат в электротехнических устройствах и для холодной сварки металлических элементов сборных конструкций (при встречном движении скорость соударения возрастает почти в 2 раза) [30].

Более перспективными для магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов следует считать разработки, начатые в 2002г. в ХПИ и проводимые по настоящее время в ХНАДУ [34-38].

## ВЫВОДЫ

1. Проведен краткий обзор основных мировых достижений нового направления магнитно-импульсной обработки металлов связанного с притяжением заданных участков листовых металлов при производстве и ремонте транспортных средств.

2. Дано обоснование актуальности развития магнитно-импульсной обработки металлов в новом направлении.

3. Раскрыты основные первоисточники нового направления МИОМ.

4. Приведены альтернативные методы рихтовки и реставрации повреждённых листовых металлов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, С.А. Циголева // Электричество. – М., 2011. – № 4. – С. 55-62.
2. Батыгин Ю. В. Цилиндрический виток индуктора с разрезом как инструмент для магнитно-импульсной обработки металлов / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // Электричество. – М., 2011. – № 12. – С. 53-59.
3. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Т.3, – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
4. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 с.
5. Пат. 3,196,649 USA (США). Devices for metal-forming by magnetic tension / Harold P. Furth; заявитель и патентообладатель Advanced Kinetiks, Inc., Costa Mesa, California. – № 173,680; заявл. 16.02.1962; опубл. 27.07.1965.
6. Пат. 3,998,081 USA (США), B21D 26/14. Electromagnetic

- dent puller / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; заявитель и патентообладатель The Boeing Company, Seattle, Wash. – № 489,290; заявл. 17.07.1974; опубл. 21.12.1976.
7. Пат. 4,148,091 USA (США), H02M 5/40. Electromagnetic force machine with universal portable power supply / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; заявитель и патентообладатель The Boeing Company, Seattle, Wash. – № 864,735; заявл. 27.12.1977; опубл. 03.04.1979.
8. Пат. 4,986,102 USA (США), B21D 26/14. Electromagnetic dent remover with tapped work coil / Hendrickson Glen I., Hansen Karl A.; заявитель и патентообладатель The Boeing Company, Seattle, Wash. – № 355,563; заявл. 23.05.1989; опубл. 22.01.1991.
9. Пат. 5,046,345 USA (США), B21D 1/06. Power supply for electromagnetic proof load tester and dent remover / Zieve Peter B.; заявитель и патентообладатель Peter B. Zieve. – № 451,106; заявл. 15.12.1989; опубл. 10.09.1991.
10. Electromagnetic Dent Removal // Матеріали сайту – 2009. – Режим доступу: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>.
11. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover // Матеріали сайту – 2009. – Режим доступу: <http://www.fluxtronic.com/product.php>.
12. Пат. 4,754,637 USA (США), B21D 1/12. Electromagnetic dent removing tool / Danny W. O'Dell; заявитель и патентообладатель Danny W. O'Dell, Calument City. – № 38/622; заявл. 14.04.1987; опубл. 05.07.1988.
13. Пат. 6,538,250 B1 USA (США), B21D 1/12. Apparatus and method for vacuum dent repair / Borchert Donald Paul; заявитель и патентообладатель Dent Defyer Inc. – № 09/707,562; заявл. 06.11.2000; опубл. 25.03.2003.
14. Kapitza P. L. A method of Producing Strong Magnetic Fields / P. L. Kapitza // II Proc. of Royal Soc. Ser. A – 1924. – vol.105 – P.691.
15. Kapitza P. L. Further Developments of the Method of Obtaining Strong Magnetic Fields / P. L. Kapitza // II Proc. of Royal Soc. Ser. A. – 1927. – vol.115. – N.A.777 – P.658.
16. Баранов М.И. Петр Леонидович Капица – основоположник техники сильных импульсных магнитных полей / М. И. Баранов // Электротехника і електромеханіка. – 2005. – № 3. – С. 5-8.
17. Пат. 7,124,617 B2 USA (США), B21J 15/24 B21D 5/00. Magnetic dent removal device, method and kit / Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe; заявитель и патентообладатель Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe, Hickory, Arlington Heights. – № 10/341,611; заявл. 14.01.2003; опубл. 24.10.2006.
18. Пат. 7,143,627 B2 USA (США), B21J 15/24. Apparatus and method for removing dents from metal / James M. Akins; заявитель и патентообладатель James M. Akins, Dublin. – № 11/138,057; заявл. 26.05.2005; опубл. 05.12.2006.
19. Пат. 4,252,008 USA (США), B21D 26/14. Apparatus for removing dents from automobile bodies and the like / William L. Dibbens; заявитель и патентообладатель William L. Dibbens. – № 12/648; заявл. 16.02.1979; опубл. 24.02.1981.
20. Пат. 6,014,885 USA (США), B21D 1/06. Dent removal apparatus and method of operation / Gerald J. Griffaton; заявитель и патентообладатель Gerald J. Griffaton, Berwyn. – № 08/958,424; заявл. 27.10.1997; опубл. 18.01.2000.
21. Пат. 74909 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хавін В.Л.; заявитель и патентообладатель ХПІ. – № 2004010542; заявл. 26.01.04; опубл. 15.02.06, Бюл. № 2.
22. Пат. EP 1341621 B1, Germany B21D 1/06. Planishing device and method / Meichtry Ralph; заявитель и патентообладатель Rentsch & Partner. – № 00977335.9; заявл. 05.12.2000; опубл. 13.06.2002.
23. Пат. 6,874,347 B2, USA (США) B21D 1/06. Planishing device and method / Meichtry Ralph; заявитель и патентообладатель Meichtry Ralph. – № 10/258,397; заявл. 13.01.2002; опубл. 05.04.2005.
24. Пат. WQ 03/008125 A1, B21D 1/06. Device and method for removing the dents in sheet steel parts / Meichtry Ralph; заявитель и патентообладатель IP & T Rentsch & Partner. – № 1354/01; заявл. 19.07.2002; опубл. 30.01.2003.
25. Пат. EP 1459814 B1, Germany B21D 1/06. Device for removing dents from sheet metal parts / Meichtry Ralph; заявитель и патентообладатель Rentsch Rudolf A., Rentsch & Partner. – № 04006194.7; заявл. 17.03.2003; опубл. 16.03.2004.
26. Пат US WO/2006/119661. Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan; заявитель и патентообладатель Rentsch & Partner. – № 60/680,303; заявл. 11.05.2006; опубл. 16.11.2006.
27. Пат. US 2008/0163661 A1 USA (США). Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan; заявитель и патентообладатель Ostrolenk faber gerb & soffon, New York. – № 11/910,788; заявл. 11.05.2006; опубл. 10.07.2008.
28. Welcome to BETAG Innovation // Матеріали сайту – 2012. – Режим доступу: [www.beulentechnik.com](http://www.beulentechnik.com).
29. Батыгин Ю.В. Магнитное поле в системе из двух соленоидов, разделенных тонкостенными проводниками. / Батыгин Ю. В., Л.Т. Хищенко, И.И. Щетинская // Техническая электродинамика. К.:1990. – № 4. – С. 3-8.
30. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хищенко. – Т.1; под ред. Ю.В. Батыгина. – [2-е изд.]. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с.
31. Batygin Yu. V. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky, L.T. Khimenko // Proceedings of the 1 – st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. P. 157-160.
32. Пат. 75676 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хищенко Л.Т.; заявитель и патентообладатель ХПІ. – № 2004010512; заявл. 23.01.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.
33. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов / Г.А. Шнеерсон. – [2-е изд.] – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 200с.
34. Лаборатория электромагнитных технологий // Матеріали сайту – 2012. <http://electromagnetic.comoj.com>.
35. Батыгин Ю.В. Физические основы создания систем для магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Г.С. Сериков, Е.А. Чаплигин // Автомобильный транспорт. – Харків: ХНАДУ, 2009. – Вып. 25. – С. 181-185.
36. Батыгин Ю.В. Эксперименты по притяжению заданных участков тонкостенных стальных пластин / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Д.О. Смирнов // Вестник ХНАДУ. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – Вып. 49. – С. 112-115.
37. Гнатов А.В. Магнитно-импульсная установка – источник мощности, обеспечивающий серийный режим генерации разрядных импульсов / А.В. Гнатов, А.М. Дробинин // Вестник ХНАДУ.– Харьков: ХНАДУ, 2011. – Вып. 55. – С. 130-134.
38. Батыгин Ю.В. Расчет электродинамических процессов в согласующем устройстве цилиндрического типа с двумя разомкнутыми вторичными витками / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, И.С. Трунова // Вестник ХНАДУ. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – В. 56. – С. 30-36.
39. Батыгин Ю.В. Теория и эксперимент магнитно-импульсного притяжения/ отгалкивания тонкостенных листовых ферромагнетиков / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // Электричество. – М., 2012. – № 8. – С. 58-65.
40. Прогресивні технології в автотранспортних засобах. – Ч.2: Фізичні основи магнітно-імпульсних технологій безконтактного рихтування кузовних елементів автомобіля.: навч. посіб / [А.В. Гнатов, Ю.В. Батигін, С.А. Чаплигин, І.С. Трунова] – Харків: ХНАДУ, 2011. – Ч. 2. – 176 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Batygin Yu.V. Prityazhenie tonkostennykh metallicheskih listov magnitnym polem odnovitkovogo induktora / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, S.A Schigoleva // `Elektrichestvo. - M., 2011. - № 4. - S. 55-62. 2. Batygin Yu. V. Cilindricheskij vitok induktora s razrezom kak instrument dlya magnitno-impul'snoj obrabotki metallov / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov // `Elektrichestvo. - M., 2011. - № 12. - S. 53-59. 3. Turenko A.N. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tehnologij. Teoriya i `eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi polyami / A.N. Turenko, Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov. - T.3, - Har'kov: HNADU, 2009. - 240 s. 4. Batygin Yu. V. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tehnologij. Magnitno-impul'snye tehnologii beskontaktnoj rihtovki kuzovnykh `elementov avtomobilya: monografiya / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, E.A. Chaplygin. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 - 242 s. 5. Pat. 3,196,649 USA (SShA). Devices for metal-forming by magnetic tension / Harold P. Furth; zayavitel' i patentoobladatel' Advanced Kinetiks, Inc., Costa Mesa, California. - № 173,680; zayavl. 16.02.1962; opubl. 27.07.1965. 6. Pat. 3,998,081 USA (SShA), B21D 26/14. Electromagnetic dent puller / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; zayavitel' i patentoobladatel' The Boeing Company, Seattle, Wash. - № 489,290; zayavl. 17.07.1974; opubl. 21.12.1976. 7. Pat. 4,148,091 USA (SShA), H02M 5/40. Electromagnetic force machine with universal portable power supply / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; zayavitel' i patentoobladatel' The Boeing Company, Seattle, Wash. - № 864,735; zayavl. 27.12.1977; opubl. 03.04.1979. 8. Pat. 4,986,102 USA (SShA), B21D 26/14. Electromagnetic dent remover with tapped work coil / Hendrickson Glen I., Hansen Karl A.; zayavitel' i patentoobladatel' The Boeing Company, Seattle, Wash. - № 355,563; zayavl. 23.05.1989; opubl. 22.01.1991. 9. Pat. 5,046,345 USA (SShA), B21D 1/06. Power supply for electromagnetic proof load tester and dent remover / Zieve Peter B.; zayavitel' i patentoobladatel' Peter B. Zieve. - № 451,106; zayavl. 15.12.1989; opubl. 10.09.1991. 10. Electromagnetic Dent Removal // Materiali sajtu - 2009. - Rezhim dostupu: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>. 11. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover // Materiali sajtu - 2009. - Rezhim dostupu: <http://www.fluxtronic.com/product.php>. 12. Pat. 4,754,637 USA (SShA), B21D 1/12. Electromagnetic dent removing tool / Danny W. O'Dell; zayavitel' i patentoobladatel' Danny W. O'Dell, Calumet City. - № 38/622; zayavl. 14.04.1987; opubl. 05.07.1988. 13. Pat. 6,538,250 V1 USA (SShA), B21D 1/12. Apparatus and method for vacuum dent repair / Borchert Donald Paul; zayavitel' i patentoobladatel' Dent Defyer Inc. - № 09/707,562; zayavl. 06.11.2000; opubl. 25.03.2003. 14. Kapitza P. L. A method of Producing Strong Magnetic Fields / P. L. Kapitza // II Proc. of Royal Soc. Ser. A - 1924. - vol.105 - P.691. 15. Kapitza P. L. Further Developments of the Method of Obtaining Strong Magnetic Fields / P. L. Kapitza // II Proc. of Royal Soc. Ser. A - 1927. - vol.115. - P.658. 16. Baranov M.I. Petr Leonidovich Kapica - osnovopolozhnik tehniki sil'nykh impul'snykh magnitnykh polej / M. I. Baranov // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2005. - № 3. - S. 5-8. 17. Pat. 7,124,617 B2 USA (SShA), B21J 15/24 B21D 5/00. Magnetic dent removal device, method and kit / Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe; zayavitel' i patentoobladatel' Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe, Hickory, Arlington Heights. - № 10/341,611; zayavl. 14.01.2003; opubl. 24.10.2006. 18. Pat. 7,143,627 B2 USA (SShA), B21J 15/24. Apparatus and method for removing dents from metal / James M. Akins; zayavitel' i patentoobladatel' James M. Akins, Dublin. - № 11/138,057; zayavl. 26.05.2005; opubl. 05.12.2006. 19. Pat. 4,252,008 USA (SShA), B21D 26/14. Apparatus for removing dents from automobile bodies and the like / William L. Dibbens; zayavitel' i patentoobladatel' William L. Dibbens. - № 12/648; zayavl. 16.02.1979; opubl. 24.02.1981. 20. Pat. 6,014,885 USA (SShA), B21D 1/06. Dent removal apparatus and method of operation / Gerald J. Griffaton; zayavitel' i patentoobladatel' Gerald J. Griffaton, Berwyn. - № 08/958,424; zayavl. 27.10.1997; opubl. 18.01.2000. 21. Pat. 74909 Ukraina, MPK B 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoj obrabotki tonkostennykh metallevih zagotovok / Batigin Yu.V., Lavinskij V.I., Havin V.L.; zayavitel' i patentoobladatel' HPI. - № 2004010542; zayavl. 26.01.04; opubl. 15.02.06, Byul. № 2. 22. Pat. EP 1341621 B1, Germany B21D 1/06. Planishing device and method / Meichtry Ralph; zayavitel' i patentoobladatel' Rentsch & Partner. - № 00977335.9; zayavl. 05.12.2000; opubl. 13.06.2002. 23. Pat. 6,874,347 V2, USA (SShA) B21D 1/06. Planishing device and method / Meichtry Ralph; zayavitel' i patentoobladatel' Meichtry Ralph. - № 10/258,397; zayavl. 13.01.2002; opubl. 05.04.2005. 24. Pat. WQ 03/008125 A1, B21D 1/06. Device and method for removing the dents in sheet steel parts / Meichtry Ralph; zayavitel' i patentoobladatel' IP & T Rentsch & Partner. - № 1354/01; zayavl. 19.07.2002; opubl. 30.01.2003. 25. Pat.EP 1459814 B1, Germa-

ny B21D 1/06. Device for removing dents from sheet metal parts / Meichtry Ralph; zayavitel' i patentoobladatel' Rentsch Rudolf A., Rentsch & Partner. - № 04006194.7; zayavl. 17.03.2003; opubl. 16.03.2004. 26. Pat US WO/2006/119661. Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan; zayavitel' i patentoobladatel' Rentsch & Partner. - № 60/680,303; zayavl. 11.05.2006; opubl. 16.11.2006. 27. Pat. US 2008/0163661 A1 USA (SShA). Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan; zayavitel' i patentoobladatel' Ostrolenk faber gerb & soffon, New York. - № 11/910,788; zayavl. 11.05.2006; opubl. 10.07.2008. 28. Welcome to BETAG Innovation // Materiali sajtu - 2012. - Rezhim dostupu: [www.beulentechnik.com](http://www.beulentechnik.com) <<http://www.beulentechnik.com>>. 29. Batygin Yu.V. Magnitnoe pole v sisteme iz dvuh solenoidov, razdelennykh tonkostennymi provodnikami. / Batygin Yu. V., L.T. Himenko, I.I. Schetinskaya // Tehnicheskaya `elektrodinamika. K.:1990. - № 4. - S. 3-8. 30. Batygin Yu. V. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tehnologij / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinskij, L.T. Himenko. - T.1; pod red. Yu.V. Batygina. - [2-e izd.]. - Har'kov: MOST-Tornado, 2003. - 284 s. 31. Batygin Yu. V. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky, L.T. Khimenko // Proceedings of the 1 - st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. P. 157-160. 32. Pat. 75676 Ukraina, MPK B 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoj obrabotki tonkostennykh metallevih zagotovok / Batigin Yu.V., Lavinskij V.I., Himenko L.T.; zayavitel' i patentoobladatel' HPI. - № 2004010512; zayavl. 23.01.04; opubl. 15.05.06, Byul. № 5. 33. Shneerson G.A. Polya i perehodnye processy v apparature sverh sil'nykh tokov / G.A. Shneerson. - [2-e izd.] - M.: `Energoatomizdat, 1992. - 200s. 34. Laboratoriya `elektromagnitnykh tehnologij // Materiali sajtu - 2012. <<http://electromagnetic.comoj.com>>. 35. Batygin Yu.V. Fizicheskie osnovy sozdaniya sistem dlya magnitno-impul'snogo prityazheniya tonkostennykh listovykh metallov / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, G.S. Serikov, E.A. Chaplygin // Avtomobil'nyj transport. - Harkiv: HNADU, 2009. - Vyp. 25. - S. 181-185. 36. Batygin Yu.V. `Eksperimenty po prityazheniyu zadannykh uchastkov tonkostennykh stal'nykh plastin / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, D.O. Smirnov // Vestnik HNADU. - Har'kov: HNADU, 2010. - Vip. 49. - S. 112-115. 37. Gnatov A.V. Magnitno-impul'snaya ustanovka - istochnik moschnosti, obespechivayuschij serijnyj rezhim generacii razryadnykh impul'sov / A.V. Gnatov, A.M. Drobinin // Vestnik HNADU.- Har'kov: HNADU, 2011. - Vyp. 55. - S. 130-134. 38. Batygin Yu.V. Raschet `elektrodinamicheskikh processov v soglasuyuschem ustrojstve cilindricheskogo tipa s dvumya razomknutyimi vtornichnymi vitkami / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, I.S. Trunova // Vestnik HNADU. - Har'kov: HNADU, 2012. - V. 56. - S. 30-36. 39. Batygin Yu.V. Teoriya i `eksperiment magnitno-impul'snogo prityazheniya/ ottalkivaniya tonkostennykh listovykh ferromagnetikov / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov // `Elektrichestvo. - M., 2012. - № 8. - S. 58-65. 40. Progressivni tehnologii v avtotransportnih zasobah. - Ch.2: Fizichni osnovi magnitno-impul'snih tehnologij bezkontaktnogo rihtuvannya kuzovnykh elementiv avtomobilya.: navch. posib / [A.V. Gnatov, Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin, I.S. Trunova] - Harkiv: HNADU, 2011. - Ch. 2. - 176 s.

Поступила 24.12.2012

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., доц.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, кафедра физики  
61002, Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ,  
тел. (057) 707-37-27, e-mail: kalifus@yandex.ru

Gnatov A.V.

### **A new trend in magnetic-pulse metal working associated with thin-walled sheet metal attraction.**

#### **History and development prospects.**

Within the scope of this article, a summary is presented on the main world achievements of the new trend in magnetic-pulse metal working associated with attraction of specified sheet metal sections in vehicle production and repair. The importance of the new trend has been justified, its basic sources disclosed. Alternative straightening methods for damaged sheet metals are given.

**Key words – magnetic-pulse metal working, magnetic pulse installation, straightening, dents removal, repair of vehicles, inductor.**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СОВМЕЩЕННОМ СОГЛАСУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА С МАССИВНЫМ ОДНОВИТКОВЫМ ИНДУКТОРОМ

*Запропоновано, в якості інструменту магнітно-імпульсного методу використовувати погоджуючий пристрій, суміщений з одновитковим масивним індуктором. Проведено дослідження електромагнітних процесів в суміщеному погоджуючому пристрої циліндричного типу. Визначено його основні електромагнітні параметри та характеристики.*

*Предложено, в качестве инструмента магнитно-импульсного метода использовать согласующее устройство, совмещенное с одновитковым массивным индуктором. Проведено исследование электромагнитных процессов в совмещенном согласующем устройстве цилиндрического типа. Определены его основные электромагнитные параметры и характеристики.*

### ВВЕДЕНИЕ

Разработки с использованием энергии электромагнитных полей в современной промышленности, например, в практике реставрации поврежденных кузовных покрытий автомобилей, в наше время являются весьма актуальными и перспективными. В связи с этим возрастает необходимость в осуществлении различных технических разработок и усовершенствований всевозможных технических систем и устройств, которые позволяют производить внешнюю бесконтактную магнитно-импульсную рихтовку [1-3]. К таким устройствам относятся согласующие устройства (СУ) – импульсные трансформаторы тока. Данные устройства применяют в практике магнитно-импульсной обработки металлов для повышения уровня энергии, передаваемой от мощных импульсных установок (источников мощности) в малоиндуктивные нагрузки [2, 4-6].

СУ в магнитно-импульсной обработке металлов являются неотъемлемыми составляющими большинства схем практической реализации передовых промышленных технологий и, как говорилось ранее, представляют собой импульсные трансформаторы тока, первичная обмотка которых подключается к выходу разрядного контура магнитно-импульсной установки – источника мощности, а вторичная – к входным клеммам индуктора – инструмента метода.

Назначение СУ состоит в преобразовании амплитудно-временных параметров тока при разряде емкостных накопителей, что позволяет существенно повысить величину силового воздействия на обрабатываемый объект [4, 5].

Среди возможных видов СУ выделяются конструкции дискового и цилиндрического типа.

Для повышения прочностных показателей и исключения высоких переходных сопротивлений (значительно увеличивающих эквивалентное сопротивление нагрузки вторичного контура), которые возникают в местах подсоединения индуктора к СУ, предложена совмещенная конструкция согласующего устройства с индуктором, что означает их изготовление в виде единого целого – инструмента магнитно-импульсного воздействия (для заданной производственной операции) [6]. Следствием такого конструктивного решения является возможность существенно повысить уровень передачи энергии в рабочую зону инструмента.

Следует отметить, что подобное узко специали-

зированное решение в принципе уже имело место в традиционной магнитно-импульсной обработке металлов [4, 7, 8]. Речь идёт о концентраторах магнитного потока, применявшихся для обжима полых цилиндрических труб.

Совмещённое СУ цилиндрического типа, представляет собой устройство с вторичной обмоткой в виде полого цилиндра, одно из оснований которого выполняет также функции исполнительного органа – инструмента.

**Целью настоящей работы** является исследование электромагнитных процессов совмещённого СУ цилиндрического типа с определением его основных параметров и характеристик.

На рис. 1 представлено схематическое изображение и расчетная модель исследуемого СУ.

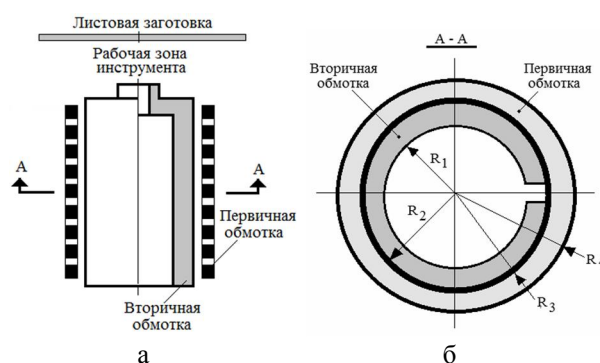


Рис. 1. Совмещённое согласующее устройство цилиндрического типа, с вторичным витком – полым цилиндром, верхнее основание которого является инструментом – одновитковым индуктором: а – схематическое изображение; б – расчётная модель

Решение проводится в полярной системе координат. Сформулируем допущения и упрощения, не влияющие на сущность предмета исследования:

- первичную обмотку – катушку с достаточно плотным размещением витков (их число –  $w$ ) можно считать цельно металлическим полым цилиндром с внутренним и внешним радиусами –  $R_3, R_4$ , соответственно;
- вторичная обмотка – полый металлический цилиндр с внутренним и внешним радиусами –  $R_1, R_2$ , соответственно;
- цилиндры первичного и вторичного витков выполнены из одинаковых немагнитных металлов с удельной электропроводностью –  $\gamma$ ;

- продольный –  $\ell$  и радиальные размеры –  $R_{1,2,3,4}$  рассматриваемой системы достаточно велики, так что  $\ell/R_{1,4} \gg 1$  и  $R_{1,2,3,4}/h \gg 1$ , где  $h = (R_3 - R_2)$  – расстояние между обмотками;
- наличием продольного разреза во внутреннем цилиндре пренебрегаем и полагаем, что система обладает аксиальной симметрией, так что  $\partial/\partial\varphi \approx 0$  ( $\varphi$  – азимутальный угол);
- в первичной обмотке согласующего устройства имеет место только азимутальная составляющая плотности тока,  $J(t) = J_m j(t)$ ,  $J_m$  – амплитуда,  $j(t)$  – временная зависимость;
- электромагнитные процессы удовлетворяют условию квазистационарности,  $\omega/c\ell \ll 1$ , где  $\omega$  – характерная циклическая частота,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\ell$  – наибольший характерный геометрический размер в системе.

Для решения поставленной задачи согласно расчётной модели на рис. 1,б выделим следующие области: 1 – внутренняя полость,  $r \in [0, R_1]$ ; 2 – металл внутреннего цилиндра,  $r \in [R_1, R_2]$ ; 3 – диэлектрическая полость между цилиндрами,  $r \in [R_2, R_3]$ ; 4 – металл внешнего цилиндра,  $r \in [R_3, R_4]$ ; 5 – свободное пространство вне системы,  $r \in [R_4, \infty)$ .

Электромагнитные процессы в рассматриваемой системе описываются фундаментальной системой уравнений Максвелла для ненулевых компонент вектора напряжённости электрического и магнитного полей  $E_\varphi(r, t) \neq 0$ ,  $H_z(r, t) \neq 0$ .

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r) & (1) \\ -\frac{\partial H_z(p, r)}{\partial r} = p \cdot \varepsilon_0 \cdot E_\varphi(p, r) & (2) \\ -\frac{\partial H_z(p, r)}{\partial r} = \gamma \cdot E_\varphi(p, r) & (3) \end{cases}$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $\mu_0$ ,  $\varepsilon_0$  – магнитная и диэлектрическая проницаемости свободного пространства;  $E_\varphi(p, r) = L\{E_\varphi(t, r)\}$ ,  $H_z(p, r) = L\{H_z(t, r)\}$ .

Система уравнений (1) – (3) в средах с разными электрофизическими характеристиками (вакуум и металл) приводится к соответствующим дифференциальным уравнениям для напряжённости электрического поля:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r)) \right) - k_{1,2}^2(p) \cdot E_\varphi(p, r) = 0, \quad (4)$$

где  $k_1(p)$  – волновое число в металле,  $k_1(p) = \sqrt{p\mu_0\gamma}$ ;  $k_2(p)$  – волновое число в вакууме,  $k_2(p) = p/c$ .

Решение поставленной задачи начнём с интегрирования уравнения (4) во внутренней и внешней областях рассматриваемой системы – 1 ( $r \in [0, R_1]$ ) и 5 ( $r \in [R_4, \infty)$ ).

В вакууме волновое число для реальных рабочих частот магнитно-импульсной обработки металлов (до 50÷70 кГц) [4, 9] таково, что  $|k_2^2(p) = (p/c)^2| \rightarrow 0$ . В пренебрежении слагаемыми, содержащими данный множитель, уравнение (4) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r)) \right) \approx 0. \quad (5)$$

Фундаментальная система решений уравнения (5) есть линейная комбинация степенных функций вида [10]:

$$E_\varphi(p, r) = \frac{A_1(p)}{2} \cdot r + A_2(p) \cdot \frac{1}{r}, \quad (6)$$

где  $A_{1,2}(p)$  – произвольные постоянные интегрирования.

Учитывая ограниченность напряжённости электрического поля во внутренней полости системы и вне её, записываем выражения для  $E_\varphi(p, r)$  в каждой из указанных областей.

Так, для  $r \in [0, R_1]$ ,

$$E_\varphi^{(1)}(p, r) = \frac{A_1(p)}{2} \cdot r. \quad (7)$$

Для  $r \in [R_4, \infty)$ ,

$$E_\varphi^{(4)}(p, r) = A_2(p) \cdot \frac{1}{r}. \quad (8)$$

С помощью (2) и выражений (7), (8) находим напряжённости магнитного поля.

Для  $r \in [0, R_1]$ ,

$$H_z^{(1)}(p, r) = -\frac{A_1(p)}{p \cdot \mu_0}. \quad (9)$$

Независимость напряжённости магнитного поля от радиальной координаты во внутренней полости согласуется с аналогичным результатом, полученным ранее авторами [11], и объясняется принятыми физическими условиями работы рассматриваемой электродинамической системы.

Для  $r \in [R_4, \infty)$ ,

$$H_z^{(4)}(p, r) \approx 0. \quad (10)$$

Достоверность результата (10) подтверждается выводами работ [9, 11], в соответствии с которыми касательная составляющая напряжённости магнитного поля плоской волны практически не проникает сквозь металл, в свободное полупространство.

Общий интеграл уравнения (6) для напряжённости электрического поля в металле внутреннего цилиндра (вторичный виток), область – 2,  $r \in [R_1, R_2]$ , запишется в виде [10]:

$$E_\varphi^{(2)}(p, r) = C_1(p) \cdot I_1(k_1(p)r) + D_1(p) \cdot K_1(k_1(p)r), \quad (11)$$

где  $I_0(z)$ ,  $K_0(z)$  – модифицированные функции Бесселя первого порядка;  $C_1(p)$ ,  $D_1(p)$  – произвольные постоянные интегрирования.

С помощью (2) и (11) находим напряжённость магнитного поля.

Для  $r \in [R_1, R_2]$ ,

$$H_z^{(2)}(p, r) = -\sqrt{\frac{\gamma}{p \cdot \mu_0}} \cdot (C_1(p) \cdot I_0(k_1(p) \cdot r) - D_1(p) \cdot K_0(k_1(p) \cdot r)), \quad (12)$$

где  $I_0(z)$ ,  $K_0(z)$  – модифицированные функции Бесселя первого порядка.

Выражения (11) и (12) можно переписать в виде экспоненциальных зависимостей от радиальных переменных.

Как было указано ранее, рабочие частоты маг-

нитно-импульсной обработки металлов не превышают  $\sim 50\div 70$  кГц [4, 9]. Например, для  $f \sim 2$  кГц и реально возможных радиальных размеров рассматриваемой системы  $R_1 \approx 0,025\div 0,25$  м при  $\gamma = 6 \cdot 10^7$  1/Ом·м (медь) справедлива оценка:

$$\sqrt{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot R_1} \gg 1 \text{ и } |k_1(p) \cdot R_{1,2,3,4}| \gg 1. \quad (13)$$

С использованием асимптотических разложений модифицированных функций Бесселя, справедливых при выполнении неравенств (13), из (11) и (12) после необходимых тождественных преобразований получаем следующие зависимости для компонент напряжённости электрического и магнитного полей в металле вторичного витка (постоянные величины, появляющиеся в процессе преобразований, включаем в константы интегрирования) [10].

Для  $r \in [R_1, R_2]$ ,

$$\begin{cases} E_{\varphi}^{(2)}(p, r) \approx \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \left( C_1(p) \cdot e^{k_1(p) \cdot r} + D_1(p) \cdot e^{-k_1(p) \cdot r} \right) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} H_z^{(2)}(p, r) \approx -\frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \frac{\gamma}{k_1(p)} \cdot \left( C_1(p) \cdot e^{k_1(p) \cdot r} - D_1(p) \cdot e^{-k_1(p) \cdot r} \right) \end{cases} \quad (15)$$

Выражения (9) и (10), аналогично зависимостям (14) и (15), переписем в виде совокупности формул, определяющих поле во внутренней полости системы.

Для  $r \in [0, R_1]$ ,

$$\begin{cases} E_{\varphi}^{(1)}(p, r) = \frac{A_1(p)}{2} \cdot r, \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} H_z^{(1)}(p, r) = -\frac{A_1(p)}{p \cdot \mu_0}. \end{cases} \quad (17)$$

Равенство нулю напряжённости магнитного поля вне системы – (10) и закон полного тока для первичной обмотки при достаточно малом изоляционном зазоре между ней и вторичной обмоткой (строго, если  $h \rightarrow 0$ ) позволяют записать, что:

$$H_z^{(2)}(p, r = R_2) \approx \frac{J(p) \cdot w}{\ell}. \quad (18)$$

где  $L$  – изображение тока, индуцированного в металле внутреннего цилиндра, также может быть определено с помощью закона полного тока [12].

$$H_z^{(2)}(p, r = R_1) - H_z^{(2)}(p, r = R_2) \approx \frac{J_1(p)}{\ell}. \quad (19)$$

Зависимость (18) подставим в выражение (19). Получим, что:

$$H_z^{(2)}(p, r = R_1) \approx \left( \frac{J_1(p) + J(p) \cdot w}{\ell} \right). \quad (20)$$

Следует отметить достоверность формулы (20). Данная запись полностью согласуется с законом полного тока для контура, ограничивающего возбуждающий и индуцированный токи (внешний и внутренний проводящие цилиндры), поскольку вне системы напряжённость стремится к нулю (10).

Условия непрерывности тангенциальных компонент вектора напряжённости электромагнитного поля на границах раздела областей 1 – 2,  $r = R_1$ , дополненные зависимостью (20), приводят к системе линейных

алгебраических уравнений относительно неизвестных произвольных постоянных в выражениях (14), (15) и тока, индуцированного во вторичной обмотке рассматриваемого согласующего устройства.

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{R_1}} \cdot \left( C_1(p) \cdot e^{k_1(p) \cdot R_1} + D_1(p) \cdot e^{-k_1(p) \cdot R_1} \right) = \frac{A_1(p) \cdot R_1}{2}, \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \frac{\gamma}{k_1(p) \sqrt{R_1}} \cdot \left( C_1(p) \cdot e^{k_1(p) \cdot R_1} - D_1(p) \cdot e^{-k_1(p) \cdot R_1} \right) = \frac{A_1(p)}{p \cdot \mu_0}, \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \frac{\gamma}{k_1(p) \sqrt{R_1}} \cdot \left( C_1(p) \cdot e^{k_1(p) \cdot R_1} - D_1(p) \cdot e^{-k_1(p) \cdot R_1} \right) \approx \approx \left( \frac{J_1(p) + J(p) \cdot w}{\ell} \right). \end{cases} \quad (23)$$

Исключив  $A_1(p)$  из уравнений (21) и (22), находим связь следующего вида:

$$C_1(p) \cdot e^{k_1(p) \cdot R_1} = \left( \frac{k_1(p) \cdot R_1 + 2}{k_1(p) \cdot R_1 - 2} \right) \cdot D_1(p) \cdot e^{-k_1(p) \cdot R_1}. \quad (24)$$

При выполнении условия (13) выражение (24) принимает вид:

$$C_1(p) \cdot e^{k_1(p) \cdot R_1} \approx D_1(p) \cdot e^{-k_1(p) \cdot R_1}. \quad (25)$$

Связь (25) подставим в уравнение (23). После перехода в пространство оригиналов, находим, что:

$$J_1(t) \approx -w \cdot J(t). \quad (26)$$

Достоверность результата (26) подтверждается сравнением с аналогичной зависимостью для индуцированных токов в СУ с двумя вторичными витками в виде коаксиальных полых цилиндров, между которыми размещена первичная многovitковая обмотка [3]. В пределе, когда толщина внешнего цилиндра-витка стремится к нулю, индуцированный ток, так же как и в (26), пропорционален току индуктора с коэффициентом пропорциональности, равным числу витков в первичной обмотке.

Зависимости, полученные при проведении настоящих вычислений, приводят к следующему выводу: при достаточной длине системы ( $\ell \gg R_{\max}$ ,  $R_{\max}$  – максимальный радиус) и выполнении двойного неравенства (13) ( $\sqrt{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot R_{\min}} \gg 1$ ,  $R_{\min}$  – минимальный радиус) величина коэффициента трансформации по току достигает своего максимального значения, равного числу витков в первичной обмотке рассмотренного согласующего устройства.

## ВЫВОДЫ

1. В ходе проведенных исследований предложена система конструктивного совмещения согласующего устройства и инструмента (одновитковый индуктор) для магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов, что позволяет существенно повысить уровень передачи энергии от источника мощности в рабочую зону инструмента.

2. Установлено, что для определённой геометрии системы, временных параметров тока в первичной