



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славні імена

Баранов М.И.	Майкл Фарадей и его научные заслуги перед человечеством	3
---------------------	---	----------

Електричні машини та апарати

Дёгтев В.Г., Бабушанов А.В., Чеснов Я.А.	Исследование магнитного поля в воздушном зазоре синхронного неявнополюсного генератора	13
Голенков Г.М., Веремеенко А.В., Богаенко М.В., Попков В.С.	Распределение магнитной индукции в зазоре коаксиально-линейного асинхронного двигателя с фазной обмоткой на бегуне	18
Лущик В.Д., Варванський А.Ю.	Стартер-генератор постійного струму з неявнополюсним статором для тепловозів	21
Милых В.И., Майстренко А.М.	Математическая модель двигателя постоянного тока для исследовательского виртуального стенда и ее практическая реализация	25
Шинкаренко В.Ф.	Уровни представления знаний и классы решаемых задач в технологии генетического предвидения	31

Техніка сильних електричних та магнітних полів

Баранов М.И., Носенко М.А.	Сравнение аналитического и численного решений нестационарной электротепловой задачи при воздействии тока молнии на металлическую обшивку летательного аппарата	37
Бржезицький В.О., Троценко Є.О., Маслюченко І.М.	До розрахунку електричної міцності малогабаритного вводу мобільної повітряної лабораторії	42
Гнатов А.В.	Электромагнитные процессы в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом, массивным экраном и тонкостенной листовой заготовкой	46
Добровольська Л.Н., Романюк М.В.	Контроль ізоляції в двопровідних мережах постійного струму	50
Живанков К.И., Лютенко Л.А., Михайлов В.М.	Электродинамические усилия, деформирующие цилиндрическую оболочку при "срезе" внешнего магнитного поля колебательным импульсом	53
Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С.	Неоднородные кабельные трассы: анализ свойств участков по результатам измерений восстанавливающегося напряжения	60

Петков А.А.	Модификация параметров испытательных устройств при переводе их в новый режим эксплуатации	63
-------------	---	----

Проблеми якості вищої освіти

Загирняк М.И., Усатюк В.М.	Проблеми якості загальної середньої освіти у світлі системи визначення результатів зовнішнього незалежного оцінювання	67
-------------------------------	---	----

Ювілеї

Шумилов Ю.А.	До 75-річчя з дня народження	73
--------------	------------------------------	----

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 15.01.03 № 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. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року. Зараз триває процес перереєстрації журналу як фахового.

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. Звіт ВИНИТИ за 2008 рік розміщено на сайті НТУ «ХПІ» (<http://www.kpi.kharkiv.edu/eie/>).

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.

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

МАЙКЛ ФАРАДЕЙ И ЕГО НАУЧНЫЕ ЗАСЛУГИ ПЕРЕД ЧЕЛОВЕЧЕСТВОМ

Наведено короткий нарис з всесвітньої історії електрики, який пов'язане з основними фундаментальними досягненнями великого англійського фізика Майкла Фарадея у області електромагнетизму.

Приведен краткий очерк из всемирной истории электричества об основных фундаментальных достижениях великого английского физика Майкла Фарадея в области электромагнетизма.

ВВЕДЕНИЕ

О великом английском физике-экспериментаторе Майкле Фарадее, его важных научных достижениях и их влиянии на развитие науки об электричестве и магнетизме было написано достаточно много и весьма обстоятельно. В этом ряду публикаций о М. Фарадее, прежде всего, следует назвать статью "Фарадей" его современника, выдающегося английского физика-теоретика Джеймса Максвелла, вышедшую из печати в известном английском журнале "Nature" (сентябрьский номер за 1873 год) через шесть лет после смерти М. Фарадея [1]. Заметным событием в популяризации научного наследия М. Фарадея стала статья известного советского физика-теоретика, академика АН СССР И.Е. Тамма "Основные идеи Фарадея и их роль в развитии науки об электричестве", вышедшая в 1932 году в авторитетном научно-техническом журнале "Электричество" к 100-летию открытия М. Фарадеем закона электромагнитной индукции (ЭМИ) [2]. В 1965 году вышла в свет фундаментальная монография "Майкл Фарадей" известного английского историка науки Л. Вильямса [3], раскрывающая научные, социально-исторические, философские и религиозные предпосылки творчества М. Фарадея. Следует отметить и юбилейные статьи в журнале "Электричество" (августовский за 1991 год и апрельский за 1992 год номера) к 200-летию со дня рождения М. Фарадея известного российского ученого в области электротехники А.В. Нетушила [4] и российского историка науки и техники Я.А. Шнейберга [5], раскрывающие жизненный путь, мастерство экспериментального изучения физических законов и научную деятельность этого физика 19-го века, оставшегося навеки в анналах мировой науки. Научный образ талантливого физика-самородка М. Фарадея, являющегося одним из основоположников такого раздела физики как электромагнетизм, столь велик, что к нему, как мы видим, в разных странах обращалось не одно поколение физиков-теоретиков, электротехников и историков-популяризаторов науки (техники). Пришло время и украинским электротехникам и электрофизикам откликнуться на столь редкий и яркий в человеческом обществе пример безграничной любви к науке об электричестве и твердого стремления к познанию истины, продемонстрированный для благодарных потомков величайшим исследователем физических процессов М. Фарадеем. Автору – электрофизику хочется надеяться, что предлагаемый им ниже краткий научно-исторический очерк о великом ученом и человеке М. Фарадее будет способствовать определенному положительному воспитанию и формированию широко-

го объективного мировоззрения у молодого поколения исследователей и специалистов нашей державы, посвятившего себя делу служения науке и технике.

Родился Майкл Фарадей 22 сентября 1791 года в предместье английского г. Лондона в простой семье рабочего-кузнеца [6]. После окончания начальной школы он с 13 лет стал работать учеником в переплетной мастерской одной из лондонских типографий. Тяга к знаниям подталкивала и заставляла его интересоваться содержанием материала книг, которые он переплетал. В эти юношеские годы он особенно любил разделы "Британской энциклопедии", посвященные физике и химии. Став взрослее, Майкл по вечерам стал посещать лекции в Британском Королевском институте, проводимые известным английским химиком и физиком Гемфри Дэви, оказавшим в целом положительную роль в судьбе М. Фарадея [3, 7]. С тех пор он стал мечтать о работе у него в любой должности. Так в напряженной физической работе переплетчика и учебно-научном самообразовании прошло для молодого Майкла восемь лет его жизни.



Рис.1. Майкл Фарадей (1791–1867 гг.) в период открытия им фундаментального закона электромагнитной индукции

В декабре 1812 года (в год Отечественной войны России против французского нашествия) 21-летний Майкл написал Г. Дэви письмо, в котором сообщал о своем твердом желании заняться научной работой в его лаборатории, входившей в состав Британского Королевского института (организован в 1800 году). К данному письму он приложил конспект прослушанных им лекций Г. Дэви, облеченный в собственноручный твердый переплет. Получив это письмо, Г. Дэви оказался в нерешительности. Для принятия решения он обратился к своему институтскому коллеге доктору Пипису, который посоветовал ему следующее [8]: *"Вели этому Фарадею мыть бутылки. Если он согласится, то из него будет толк. Если же нет, то он ни к чему не годен"*. Майкл на данное предложение научного мэтра Г. Дэви согласился. После чего в 1813 году молодой М. Фарадей был им взят на должность личного секретаря. Следует указать, что к этому времени Г. Дэви не мог временно ни читать, ни писать. Причиной тому явилось то, что во время одного из опытов он из-за взрыва в своей лаборатории химических реактивов поранил глаза. Сразу после выздоровления своего научного "патрона" и появления вакансии М. Фарадей был переведен на должность лаборанта, а затем вскоре и ассистента. С этого времени для него появилась возможность непосредственного проведения, хотя вначале и под прямым руководством профессора Г. Дэви, физических исследований. Рассмотрим ниже вкратце основные этапы и важнейшие результаты многолетних экспериментальных исследований М. Фарадея по электричеству и магнетизму.

1. ПЕРВЫЕ ШАГИ ФАРАДЕЯ В НАУКЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

Вначале остановимся на важной научной предистории исследований М. Фарадея в области электричества. В феврале 1820 года известным датским физиком Хансом Эрстедом было сделано выдающееся научное открытие, связанное с установлением магнитных свойств у постоянного электрического тока [9]. Надо отметить, что перед этим открытием он достаточно долго исследовал связь электричества с другими физическими явлениями: солнечным светом, теплотой и звуком. Но никак не давалась связь электричества с магнетизмом. Ему казалось, что эти два явления существуют отдельно друг от друга и сами по себе. Историками науки был зафиксирован тот факт, что Х. Эрстед в этот временной период постоянно носил с собой магнит – напоминание о давно поставленной перед собой сложной научной задаче. Так в поисках истины проходили годы, а усилия по разгадке этой непростой задачи природы были тщетны. И вот однажды эта задача им была решена практически за один день. Как часто бывает в науке, этому открытию помог его Величество Случай. Во время проведения 15 февраля 1820 года профессором Х. Эрстедом лекции студентам Копенгагенского университета на тему о связи электричества с теплотой проводилась демонстрация нагрева металлической проволоки из-за действия на нее протекающего по ней постоянного электрического тока. Сейчас нам с наших научных вершин хорошо известны многие физические приборы (например, электроутюги, электроплитки, элек-

тронагреватели воды и др.), использующие тепловое действие тока. Тогда же (еще до открытия в 1843 году английским физиком Джеймсом Джоулем и российским электрофизиком Эмилием Ленцем *"закона о выделении тепла гальваническим током"* [7]) такие физические опыты у их зрителей вызывали восторженное любопытство и восхищение. В процессе указанного опыта один из студентов обратил внимание на поведение магнитной стрелки оказавшегося у него в руках компаса (история мировой физики умалчивает имя студента и обстоятельства того, как у него оказался этот компас, не имевший никакого отношения к теме лекции). Этот студент с изумлением поведал присутствующим в аудитории об отклонении стрелки его компаса при протекании электрического тока по подопытной проволоке. Данная информация для Х. Эрстеда оказалась важным недостающим звеном в его размышлениях о связи электричества и магнетизма. Из последовавшей вскоре печатной научной брошюры Х. Эрстеда на тему *"Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку"* (датирована она 21 июля 1820 года) весь мир и узнал о том, что электрический ток "рождает" магнитное поле [9]. В данной работе Х. Эрстед пишет [9]: *"Из сделанных наблюдений можно заключить, что этот конфликт образует вихрь вокруг проволоки с током"*. Другими словами этот вывод Х. Эрстеда можно сформулировать и так: магнитные силовые линии окружают проводник с электрическим током. В этом ряду событий, связанных с обнаружением магнитных свойств у металлических проводников с электрическим током, следует назвать и полученные 15 сентября 1820 года французским физиком Франсуа Араго (после указанных исследований Х. Эрстеда) опытные данные, заключающиеся в том, что металлическая проволока с током притягивает к себе железные опилки [9]. Ф. Араго в это время было также установлено, что стальные иголки, расположенные под прямым углом к проволоке с током, намагничиваются. Кроме того, 30 октября 1820 года французскими учеными Био и Саваром был экспериментально установлен закон действия электрического тока на магнитный полюс (закон Био – Савара, облеченный их соотечественником Пьером Лапласом в математическую форму элементарного взаимодействия между элементом контура тока и намагниченной точкой) [9]. Опытами Ф. Араго заинтересовался выдающийся французский физик Андре Ампер. Во время посещения лаборатории Ф. Араго и демонстрации им намагничивания стальных иголок с помощью протекающего по металлической проволоке постоянного электрического тока А. Ампер предложил для увеличения намагничивающего действия проволоки на указанные иголки свернуть прямолинейную проволоку в цилиндрическую спираль. При этом стальные иголки он посоветовал разместить внутри такой спирали вдоль ее продольной оси. Проведенный в дальнейшем их совместный опыт подтвердил, что в этом случае иголки намагничиваются сильнее, чем раньше без использования спирали. Ими было установлено, что у самой спирали с током как у стального магнита обнаруживается северный и южный полюсы. Так в научном мире был изобретен *первый соленоид* – многовитко-

вая цилиндрическая катушка с протекающим по ней электрическим током. Следует подчеркнуть, что данный соленоид оказался и первым искусственно созданным электромагнитом, имевшим в дальнейших исследованиях другими физиками (в том числе и М. Фарадеем) электричества и магнетизма важнейшее значение. Физическое сходство такого соленоида, имеющего большое число витков с электрическим током, с магнитом подтолкнуло великого французского физика А. Ампера к высказанной им гениальной гипотезе [8, 9]: "*Возможно, в стальном магните существует большое число замкнутых микроконтуров с током*". В настоящее время эта гипотеза великого ученого-физика А. Ампера обоснована как теоретически, так и подтверждена экспериментально [10].

Вот в такой активной внешней электрофизической обстановке молодой и начинающий научную карьеру М. Фарадей после указанного выше открытия Х. Эрстеда приступил с октября 1820 года к самостоятельному проведению соответствующих электромагнитных исследований. Так гениальный самоучка М. Фарадей вступил на тернистый научный "путь" в области электричества, приведший его к бессмертию. Здесь требуется отметить, что это ошеломляющее открытие крайне взволновало многих ученых Британского Королевского института. Начал М. Фарадей в области электричества с того, что тщательно изучил по публикациям имеющийся в мире материал по электрическим и магнитным явлениям. На основе выполненного обзора опубликовал статью "*Опыт истории электромагнетизма*" [9]. Далее в декабре 1821 года М. Фарадей публикует результаты своих экспериментов с первой в мире моделью электродвигателя [9]. Публикации Х. Эрстеда подсказали ему идею о наличии вращения магнитного поля вокруг проводника с электрическим током. На основе этой идеи он с помощью подвижного ртутного контакта и осуществил в данной модели электродвигателя непрерывное вращение одного из полюсов стального магнита вокруг прямолинейного проводника с током [8,9]. Согласно его рисунку в рабочем блокноте этот прообраз электродвигателя мало напоминает нам привычный современный электромотор. Но именно с этой модели электродвигателя М. Фарадея и начинается мировая история электромашиностроения. Тогда же в 1822 году целеустремленный М. Фарадей и записал в своем блокноте новую для себя научную задачу [9]: "*Превратить магнетизм в электричество*". После указанной выше публикации ему пришлось выдержать научный спор с институтским коллегой Уолластоном за приоритет своей разработки, направленной на создание рабочей модели электродвигателя [8]. К этому необходимо добавить и то, что А. Ампер после своей публикации в 1823 году научного материала, связанного тоже с моделью электродвигателя, аналогичной по конструкции предложенной М. Фарадеем в 1821 году, также претендовал на данное электротехническое изобретение [8]. Тем не менее, в мировой истории электротехники приоритет в создании *первого электродвигателя* остался таки за М. Фарадеем [9].

2. ОТКРЫТИЕ ФАРАДЕЕМ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

В 1824 году возмужавший, подающий большие надежды и ставший благодаря своим экспериментальным работам в области химии и электричества известным в научных кругах М. Фарадей был избран в члены Лондонского Королевского общества (Академии наук Англии), а в 1825 году он сменил Г. Дэви на посту директора научных лабораторий Британского Королевского института [6]. В 1827 году он становится профессором химии в этом же институте. В сознании М. Фарадея часто "всплывает" давно сформулированная им задача по превращению магнетизма в электричество. В эти годы он продельывает множество физических опытов. Педантично ведет записи по исследуемым электрическим схемам и полученным опытным результатам. Каждому опыту он посвящает параграф в своих записях в рабочем журнале. С ноября 1831 года М. Фарадей начинает систематическую публикацию своих исследований по электричеству, составивших его основной трехтомный научный труд под общим названием "*Экспериментальные исследования по электричеству*" [9, 11–13, 14]. В бывшем СССР этот многолетний итоговый научный труд М. Фарадея, разбитый и сгруппированный автором по сериям, был переведен и издан лишь в середине 20-го столетия [11–13]. М. Фарадей в ходе этих электромагнитных исследований проявляет колоссальную работоспособность. Об этом может свидетельствовать хотя бы тот факт, что в этом издании последний параграф (опыт) помечен за номером №16041 [8,11–13]. Характерной особенностью этого научного труда М. Фарадея является то, что в нем автор практически не пользуется математическим аппаратом. Несмотря на это, он полон новых физических идей, а постановка задач, анализ и обобщение результатов проведенных им физических экспериментов при отсутствии формул отличаются глубоким рассмотрением вопросов электромагнетизма [8, 9]. Одержимость, экспериментальное мастерство и научная смелость, проявленные М. Фарадеем в ходе этих опытов, в конце концов, дали свой положительный результат. Спустя почти 11 лет, после упомянутых пионерских опытов Х. Эрстеда, 29 августа 1831 года М. Фарадей путем быстрого вдвигания магнитного сердечника внутрь многовитковой катушки – соленоида добивается фиксации с помощью гальванометра в этот момент времени в электрической цепи катушки броска тока [6, 9]. Так путем относительного движения проводника катушки и постоянного магнита, обеспечивающего пространственно-временное изменение магнитного поля (тока) внутри катушки, в ее цепи был впервые в мире получен электрический ток! Индукционное действие обыкновенных магнитов, приводящее к появлению тока в электрической цепи, М. Фарадей назвал магнитом – электрической индукцией [9]. Интересным историческим фактом при проведении этих экспериментов было то, что М. Фарадей проводил их в лаборатории Британского Королевского института совместно с ассистентом, расположенным вместе с гальванометром в соседней комнате. Регистрация тока в цепи катушки ими проводилась одновременно с вдвиганием указанного сердечника в катушку. Для полноты науч-

ной "картины" тех лет требуется заметить, что одновременно с М. Фарадеем примерно такие же физические опыты по индукции во Франции проводил и А. Ампер [8, 9]. Однако последний свои опыты проводил в одиночку: он сначала вдвигал магнитный сердечник в катушку, а затем шел в соседнюю комнату и смотрел на гальванометр с целью обнаружения в цепи катушки электрического тока (размещение измерительного прибора в соседней комнате, по мнению этих физиков, было необходимо для уменьшения погрешности измерения тока). Так как данный ток миллисекундного временного диапазона возникал лишь во время изменения магнитного поля во внутренней воздушной полости катушки, то к приходу А. Ампера в соседнюю комнату с гальванометром его стрелка успевала возвращаться в исходное нулевое положение. Поэтому А. Ампер никакого электромагнитного эффекта в проводимом им важном опыте и не обнаружил. Открытие электромагнитной индукции, как говорят, "носило в воздухе". Всемирная история науки показывает нам, что в природе, видимо, действует закон "созревания открытий": приходит время, когда открытие должно быть сделано, так как оно созрело [9]. У автора создается впечатление, что природа открыла одну из своих электромагнитных тайн хотела только М. Фарадею! На рис. 1 М. Фарадей как раз и запечатлен в эти годы его научного подъема и апофеоза (от греч. слова "*apothēōsis*" – "*возвеличение кого-либо*" [15]). Осенью 1831 года сообщение М. Фарадея об открытии им явления ЭМИ было опубликовано в авторитетном журнале Лондонского Королевского общества [6]. После этой публикации многие известные физики мира (например, А. Ампер и Джозеф Генри, работавший в США) с глубокой досадой осознали, что они также в своих опытах по магнитному действию токов независимо от М. Фарадея наблюдали явление ЭМИ [9]. Однако их публикации об этом крупнейшем научном открытии запоздали. Поэтому приоритет и слава *великого открытия электромагнитной индукции* по праву принадлежат М. Фарадею.

24 ноября 1831 года М. Фарадей провел новые опыты по индукции электрических токов с помощью двух изолированных друг от друга обмоток, намотанных на деревянный цилиндр [9]. Одна из них была соединена с гальванической батареей, а другая – с гальванометром. При замыкании и размыкании тока в первой обмотке стрелка гальванометра во второй обмотке отклонялась. Причем, при замыкании тока – в одну сторону, а при его размыкании – в противоположную. Действие одной электрической цепи с током на другую М. Фарадей назвал вольта – электрической индукцией [9]. М. Фарадей предположил, что эта индукция должна усиливаться, если внутрь обмоток поместить железный сердечник. Применяв железное кольцо (тор), на которое были намотаны две изолированные друг от друга и от сердечника обмотки (первичная с источником тока и вторичная с гальванометром), он экспериментально подтвердил усиление явления ЭМИ [6, 9]. Заметим, что в данных опытах *кольцо Фарадея* с двумя электрическими обмотками было *первой* в мире *моделью трансформатора*.

Отметим, что в современной терминологии названные М. Фарадеем два вида индукции имеют одно

название – "*электромагнитная индукция*". М. Фарадей в открытой им электромагнитной индукции показал, что такой новый вид индукции является динамическим процессом. Справочно отметим, что до его работ в области электричества в физике была известна лишь "*электростатическая индукция*" (открыта английским физиком Стивеном Грэйом в 1729 году [16]), связанная с наведением в физическом теле на его противоположных поверхностях электрических зарядов противоположной полярности из-за действия на него заряда, расположенного через изоляцию вблизи этого тела. М. Фарадей установил, что только в динамике взаимодействия постоянного магнитного поля неподвижного стального магнита с электрическими зарядами движущихся металлических проводников или неподвижных металлических проводников с изменяющимся во времени внешним магнитным полем магнита возможно получение в проводниках индукционного электрического тока. Он прекрасно понимал, что этот ток является по существу динамическим процессом, связанным с направленным движением электрических зарядов. Он считал, что работа, затраченная на перемещение внутрь катушки магнитного поля стального магнита или на перемещение металлического проводника в постоянном магнитном поле магнита, и создает электрический ток в проводнике. Причем, данный ток также несет с собой определенную электромагнитную энергию или "силу" в его обозначении [11–13]. Следует заметить, что после открытия М. Фарадеем явления ЭМИ и после возрождения в России в ее Академии наук физического кабинета в 1832 году ее будущим академиком-электрофизиком Эмилием Ленцем были проведены важные экспериментальные исследования, существенно продвинувшие вперед изучение этого электрофизического явления [17]. М. Фарадей за короткое время весьма подробно изучил новое явление и опытным путем установил основной закон электромагнитной индукции: электродвижущая сила (ЭДС) индукции $e_{\text{инд}}$ в проводнике возникает при изменении магнитного потока Φ , охватываемого этим проводником с индукционным (вторичным) током (например, при замыкании первичного или возбуждающего тока, размыкании первичного тока, изменении во времени t первичного тока, приближении к проводнику или удалении от него постоянного магнита) [6, 9]. Позже соотечественник М. Фарадея английский физик Д. Максвелл, разработавший новую теорию электромагнетизма [7, 18], выразил величину $e_{\text{инд}}$ в виде следующего известного математического соотношения: $e_{\text{инд}} = -d\Phi/dt$. Долгожданная цель превращения магнетизма в электричество М. Фарадеем была достигнута! Однако в дальнейшем глубинный физический микромеханизм, лежащий в основе открытого им явления ЭМИ и появления индукционного напряжения (тока) в проводнике, занимал воображение М. Фарадея в течение всей его продолжительной активной научной работы [9, 14]. Физического объяснения этого механизма ЭМИ он для себя так и не получил. На этот самый сложный вопрос пока нет ясного ответа и у современных физиков. Открытие закона ЭМИ имело тогда и имеет сейчас колоссальное воздействие на

мировую физическую науку и техническую сферу. По мнению автора, именно с открытия М. Фарадеем явления электромагнитной индукции берет свое начало и развитие такой самостоятельной отрасли науки как электротехника. Благодаря этому явлению в нашей земной цивилизации была начата новая эпоха – эпоха электричества!

Через короткое время после открытия явления ЭМИ М. Фарадей в Британском Королевском институте в конце 1831 года построил действующую модель *первого* в мире *электрогенератора*. Причем, наиболее сложного и на сегодня по своему принципу действия – униполярного генератора, основанного на круговом движении металлического проводника вокруг одного из полюсов стального магнита с постоянным магнитным полем. Позже эта конструкция электрогенератора М. Фарадеем была усовершенствована и в ней вместо обыкновенного магнита появился уже электромагнит. На рис.2 приведен внешний вид такой уникальной модели электрогенератора того далекого для нас времени (так называемого *диска Фарадея*). Из приведенного рис. 2 видно, что в данном электрогенераторе (униполярной динамо-машине) между жестко закрепленными полюсами электромагнита в вертикальной плоскости на оси вращался медный диск.

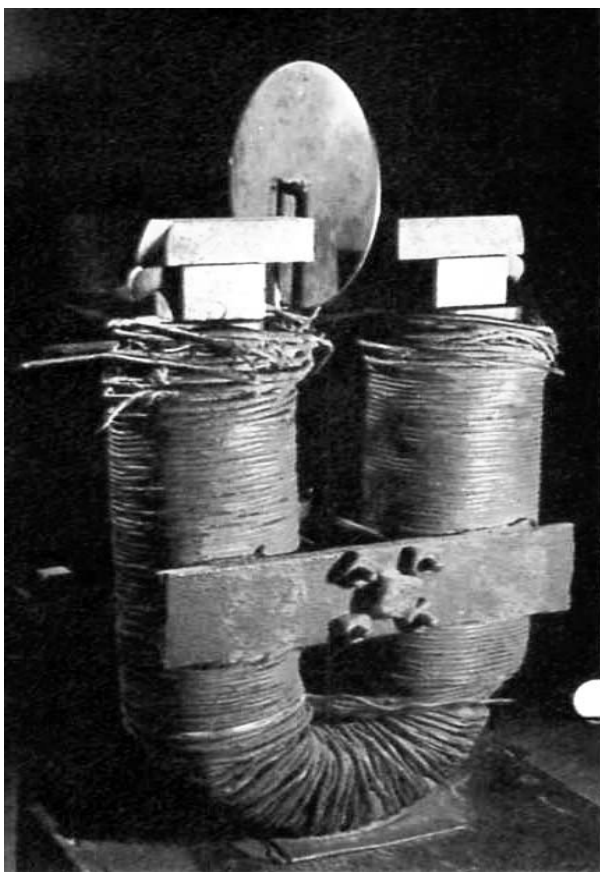


Рис. 2. Униполярная дисковая динамо-машина М. Фарадея, в которой электричество индуцировалось во вращающемся между полюсами электромагнита медном диске (внешний вид уникального исторического образца знаменитого диска Фарадея – первого в мире электрогенератора) [9]

Скользящие контакты у периферии и центра этого диска отводили генерируемый при круговом вращении диска радиальный постоянный электрический

ток к цепи, содержащей гальванометр [9]. После создания и исследования работы этой униполярной дисковой динамо-машины М. Фарадей в своем лабораторном дневнике записал [9]: "Этим было показано, что можно создать постоянный ток электричества при помощи обыкновенных магнитов". Электрогенератор, предложенный М. Фарадеем, был хорош как демонстрационная модель, но был неудобен для практического применения в электротехнике. Исторически следующим шагом в развитии электрогенераторов были разработки Пикси (1832 год) и Риччи (1833 год) [8, 9]. В электромашине Риччи был уже введен коллектор и применен магнит с токовой обмоткой – электромагнит. Новым этапом в развитии электромашин стало изобретение А. Пачинотти и З. Граммом кольцевого якоря (1870 год [9, 17]). Затем в 1872 году последовало изобретение Ф. Гефнер-Альтенеком барабанного якоря электрической машины. Это, в конечном счете, и привело машину-генератор к ее практически современному виду. Что касается электродвигателя, то его первую практическую модель с круговым вращением якоря в 1838 году создал известный российский электротехник Б.С. Якоби [8, 9]. Важнейшим прогрессивным шагом в развитии электромашин стало изобретение в Германии (1889 год) талантливым российским эмигрантом-электротехником Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским трехфазного асинхронного двигателя переменного тока, содержащего распределенную по статору обмотку и короткозамкнутую обмотку якоря (ротора) [7, 9]. Этот тип электродвигателя и поныне является основной частью широкого промышленного парка современных станков, транспортных средств и прокатных станов. Электрические машины, по мнению автора, оказались наиболее устойчивой и прочной "технической крепостью" в человеческом обществе. Вот уже более 100 лет как их конструкция в мире практически не изменяется: в каждой электромашине есть подвижные (неподвижные) магниты (электромагниты), мимо которых круговым образом быстро проносятся неподвижные (подвижные) металлические проводники обмоток с электрическим током. Подчеркнем здесь одну важную мысль по предмету нашего научного повествования: все электрические машины являются ветвями одного мощного "электромагнитного дерева", посаженного в свое время на научно-технической ниве великим английским физиком Майклом Фарадеем.

М. Фарадей, обладавший поразительной интуицией, вскоре после почти 11-ти летних напряженных поисков электромагнитной индукции и ее открытия смог прийти к гениальной идее "*электромагнитных волн*" (открыты выдающимся немецким электрофизиком Генрихом Герцем в 1888 году [19]) [7, 9]. Считая эту идею чрезвычайно важной, он для утверждения в ней своего приоритета в 1832 году оставил для хранения в архиве Лондонского Королевского общества для своих потомков запечатанный конверт с надписью "*Новые воззрения, подлежащие в настоящее время хранению в архивах Королевского общества*" [7, 20]. Через 106 лет в 1938 году этот конверт был найден и вскрыт учеными. На пожелтевшем листке, находившемся в конверте, содержались слова и научные мысли, потрясшие собравшихся английских уче-

ных. Оказалось, что М. Фарадей ясно представлял себе то, что "индуктивные явления распространяются в пространстве с некоторой скоростью в виде волн". М. Фарадей на этом листке 12 марта 1832 года написал следующее [21]: "Я пришел к заключению, что на распространение магнитного воздействия требуется время, которое, очевидно, окажется весьма незначительным. Я полагаю также, что электрическая индукция распространяется точно таким же образом. Я полагаю, что распространение магнитных сил от магнитного полюса похоже на колебания взволнованной водной поверхности. По аналогии я считаю возможным применить теорию колебаний к распространению электрической индукции. В настоящее время, насколько мне известно, никто из ученых, кроме меня, не имеет подобных взглядов". Исторический ход развития мировой физики по прошествии многих лет полностью подтвердил эти пророческие мысли гениального М. Фарадея. В 1864 году независимо от М. Фарадея из-под пера 33-х летнего английского физика-теоретика Д. Максвелла впервые появились слова "электромагнитные волны" (он просто не знал о существовании вышеуказанной записки М. Фарадея от 1832 года) [18]. Создав новую теорию электромагнетизма – теорию электромагнитного поля и изложив ее в законченном виде в своем знаменитом двухтомном научном труде "Трактат об электричестве и магнетизме" [9, 25], Д. Максвелл понял, что электромагнитное поле в материальном пространстве распространяется в виде "поперечных электромагнитных волн". Теория электромагнитного поля великого английского физика Д. Максвелла продемонстрировала полный триумф экспериментально подтвержденных и чисто интуитивных без строго доказательства физических идей М. Фарадея, касающихся электромагнетизма. По весьма меткому и образному выражению знаменитого американского физика Роберта Миллика (лауреата Нобелевской премии по физике 1923 года за определение в 1917 году элементарного заряда электрона) "Максвелл облек плембейски обнаженные представления Фарадея в аристократические одежды математики" [21].

3. УСТАНОВЛЕНИЕ ФАРАДЕЕМ ЕДИНСТВА ПРИРОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ВВЕДЕНИЕ ИМ НОВЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПОНЯТИЙ

До экспериментальных исследований М. Фарадея в области электромагнетизма в физике было широко распространено представление о существовании в природе нескольких отдельных видов электричества – вольтово электричество, магнитоэлектричество, термоэлектричество и животное электричество [6, 9]. В своей печатной работе "Идентичность электричества, полученных из различных источников" М. Фарадей однозначно показал единую природу различающихся лишь своей полярностью (своим знаком – "плюсом" или "минусом") электричеств [9]. На основании своих многочисленных опытов он приходит к фундаментальному выводу [6, 9]: "Отдельные виды электричества тождественны по своей природе, каков бы ни был их источник". Он рассматривал указанные виды электричества во взаимосвязи как единое целое. Подчеркивая *единство электричества*,

им в физику в 1833 году были введены такие новые и устоявшиеся до сих пор фундаментальные понятия как "сила электрического тока" J , "электрическое напряжение" U и "количество электричества" Q [9]. При вводе в физический обиход этих электрических понятий он указал пути их определения и измерения. М. Фарадей большое внимание уделял терминологии в физике и химии. Он также ввел в физику такие и поныне используемые нами фундаментальные понятия как: "диэлектрик", "электрод", "силовое поле", "силовые линии" и "индукция" [9, 22]. Принципиально новым в его физических воззрениях было то, что он не использовал принятое до него понятие "магнитных корпускул", а ввел понятие "магнитного поля" – особой среды или пространства, в котором действует постоянный магнит (электромагнит) [9].

Требуется заметить, что в период научной деятельности М. Фарадея в мировой физической науке существовало две теории электромагнетизма: первая – теория "силовых линий (трубок)" Фарадея и вторая – теория, разработанная выдающимися французскими учеными Кулоном, Ампером, Био, Саваром, Араго и Лапласом [7, 9]. Во второй теории исходной точкой являлось представление о "дальнодействии" – мгновенном действии на расстоянии одного физического тела на другое без промежуточной среды. Электромагнитные воззрения М. Фарадея в корне расходились с такими представлениями ученых французской физической школы. М. Фарадей был убежден в том, что "материя не может действовать там, где ее нет" [9, 21]. Для среды, через которую передается воздействие от одного физического тела к другому, М. Фарадей впервые вводит новое понятие "поле" [11–13]. Установление М. Фарадеем новой фундаментальной идеи – идеи "поля" базировалось на тщательном изучении им электрических и магнитных свойств вещества. Это "поле", по его мнению, пронизано "магнитными и электрическими силовыми линиями" [11–13]. С учетом этого физического воззрения М. Фарадей предложил метод изображения магнитного (электрического) поля с помощью силовых линий [9]. Электрические и магнитные действия тел он рассматривал как результат распространения от точки к точке продольных и поперечных натяжений якобы физически существующих силовых линий поля [6, 9]. Несмотря на его такой достаточно примитивный подход, образ силовых линий поля прочно вошел в физику как весьма удобный и наглядный метод описания электромагнитных явлений. Он разработал экспериментальную методику исследования магнитного поля с помощью пробной катушки и гальванометра [9]. Странники концепции "мгновенного дальнодействия" не принимали всерьез этих новых и не подкрепленных теоретически физических построений М. Фарадея, хотя и восхищались результатами его экспериментальных исследований в области электромагнетизма. Он первым высказал идею о том, что все пространство вокруг магнита (электромагнита) заполнено силовыми линиями, плотность (густота) которых у полюсов магнита выше, чем в других местах этого пространства. Поэтому, на его взгляд, и сила притяжения предметов у полюсов магнита больше, чем в его иных местах. Заметим, что в настоящее время для

величины плотности этих силовых линий магнитного поля используется понятие "магнитной индукции" B . М. Фарадей считал силы притяжения магнита (электромагнита) следствием изменения свойств окружающего его пространства (магнитного поля) [9]. Эта революционная на тот этап развития науки физическая идея заложила основы будущей теории электромагнитного поля, разработанной позже через многие десятки лет выдающимися физиками мира Д. Максвеллом, Г. Герцем и Оливером Хевисайдом [7, 9, 23].

Следует указать и то, что М. Фарадеем в 1838 году в электромагнетизм было введено такое неустоявшееся к настоящему времени в физике новое понятие как "*электротоническое состояние*" [9, 24]. В популярной трактовке автора этого очерка данное понятие характеризовало, по мнению М. Фарадея, особое состояние проводника вторичной цепи, подвергающегося за счет магнитного поля индукционному воздействию со стороны проводника первичной цепи. По его мнению, именно изменение этого "электротонического состояния" и приводит к возникновению индуктированной ЭДС в проводнике вторичной цепи [11–13]. Это понятие оказалось ключевым моментом в генезисе (от греч. слова "*genesis*" – "*становление*" [15]) концепции М. Фарадея и Д. Максвелла, касающейся электромагнитного поля как особой физической среды [3, 9]. Рассматриваемое понятие (на взгляд автора, его, судя по всему, можно назвать и "электровозбужденным состоянием"), а точнее "*интенсивность электротонического состояния*", явились прообразом векторного потенциала \vec{A} в современной теории поля [3, 26]. Исследуя влияние магнитного поля на различные материалы, М. Фарадей в декабре 1845 года устанавливает их магнитные свойства и вводит при этом новые понятия "*диамагнетизм*" ("намагничивание материала на встречу внешнему магнитному полю" [15]) и "*парамагнетизм*" ("намагничивание материала в направлении, совпадающем с направлением внешнего магнитного поля" [15]) [9].

4. УСТАНОВЛЕНИЕ ФАРАДЕЕМ ВЗАИМОСВЯЗИ СВЕТОВЫХ И МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Новым фундаментальным открытием М. Фарадея явилось обнаружение им одного из важных результатов воздействия внешнего постоянного магнитного поля на дневной (солнечный) свет [9, 22]. Его системный научный подход привел к учету влияния окружающей среды, в которой происходит электромагнитное взаимодействие света и указанного магнитного поля. Это позволило М. Фарадею в сентябре 1845 года в опытах с "тяжелым стеклом" установить вращение плоскости поляризации (плоскости, в которой расположен вектор напряженности электрического поля \vec{E} световой волны) поляризованного света при его распространении в том или ином веществе вдоль направления, параллельного магнитным силовым линиям внешнего поля (вектору напряженности воздействующего магнитного поля \vec{H}) [9, 10, 22]. Открытие вращения плоскости поляризации света в магнитном поле (*эффект Фарадея*), как и открытие "*явления электромагнитной индукции*", стало в физике событием исключительной важности. Оно впер-

вые продемонстрировало физическую связь оптических явлений с магнетизмом и соответственно с электромагнитными процессами в веществе. В [11–13] имеются данные о проведенных М. Фарадеем в 1859 году опытах, направленных на поиск результатов воздействия внешнего постоянного магнитного поля на свет в процессе его испускания физическим телом. Он рассматривал свет, электричество и магнетизм не как самостоятельные "субстанции", а как "субстанции", имеющие взаимную физическую связь. Он старался исследовать их взаимодействие через динамические состояния используемой в опытах среды [11–13]. Отсутствие на то далекое от нас время необходимых мощных источников магнитного поля и сверхчувствительных спектроскопических приборов не позволило М. Фарадею обнаружить соответствующий физический эффект в их взаимодействии. Данный эффект, связанный с изменением в магнитном поле частоты обращения связанных электронов в атомах вещества и соответственно спектров их светового излучения, был обнаружен значительно позднее (в 1896 году) известным голландским физиком Питером Зееманом (*нормальный эффект Зеемана*) [9, 10, 22].

5. ОТКРЫТИЕ ФАРАДЕЕМ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ ЭЛЕКТРОХИМИИ

Экспериментальные исследования прохождения постоянного электрического тока через различные вещества позволили М. Фарадею в 1834 году открыть основной закон электролиза, поставивший электрохимию как науку на путь точного количественного анализа электрохимических процессов [9, 11–13]. Сжато этот закон он сформулировал следующим образом [9, 11]: "*Химическое действие электрического тока прямо пропорционально количеству проходящего через электролит электричества*". Библиографы этого ученого отмечают, что данному успеху М. Фарадея в установлении пропорциональности химических и электрохимических эквивалентов поспособствовал удачный выбор им для рассматриваемых опытов по электролизу ионов серебра Ag [8, 9]. М. Фарадеем было показано принципиальное различие физических механизмов прохождения электрического тока в твердых металлах и жидких электролитах. В электролитах, по его мнению, перенос электричества осуществляется электрически заряженными микрочастицами "*ионами*" (от греч. слова "*ion*" – "*идущий*" [15]), а в металлах – иными частицами (свободными электронами, как было выяснено физиками позже [9]). Так дополнительно к примененному им новому понятию "*ион*" были введены им же и такие новые термины как "*анион*" (ион, оседающий на аноде) и "*катион*" (ион, оседающий на катоде) [9]. При этом им впервые было использовано понятие "*электрохимического эквивалента*" (этим термином М. Фарадей называл "*числа, соответствующие весовым количествам анионов и катионов, оседающим на аноде и катоде*" [9]), а также были введены в химико-физический обиход такие новые и поныне применяемые термины как: "*катод*", "*анод*", "*электролиз*" и "*электролит*" [9]. М. Фарадей открыл, что прохождение одинакового количества электричества Q через электролит сопровождается выделением на электро-

дах одного и того же числа грамм-эквивалентов любого химического вещества. Он показал, что один грамм-эквивалент вещества выделяется при прохождении через электролит количества электричества $Q = 96,5 \cdot 10^3$ Кл (*число Фарадея*) [6]. На основании этих электрохимических опытов он пришел к выводу о дискретности (порционности) электричества и существовании в природе элементарного электрического заряда [9]. Через многие десятилетия (в 1917 году после знаменитых опытов Р. Милликена) выяснилось, что таким элементарным зарядом является заряд электрона $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл (данная микрочастица была открыта выдающимся английским физиком Джозефом Томсоном в 1897 году в высоковольтных газоразрядных трубках [7, 9]). Кроме того, им был предложен оригинальный метод определения количества протекшего по электролиту электричества Q по количеству жидкости, разложенной в ходе процесса электролиза. На основании таких электрохимических экспериментов М. Фарадеем в 1834 году было установлено, что электрический ток в гальваническом элементе (низковольтном источнике электропитания) обусловлен не контактной разностью потенциалов его двух разнородных металлических электродов, а электрохимическим процессом, протекающим как на их поверхностях, так и в веществе между ними [8, 9].

6. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ФАРАДЕЯ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ГАЗАХ

В период 1835 – 1838 годов М. Фарадей провел экспериментальные исследования взаимодействия неподвижных зарядов в диэлектрической среде и пришел к объяснению поляризации в электрическом поле диэлектриков [6, 9, 12]. Ввел для количественной характеристики впервые примененного им термина "*диэлектрик*" число, которое назвал "*удельной индукцией*" (ныне его называют "*диэлектрической проницаемостью*" ϵ) [9]). Эти исследования подводят М. Фарадея к мысли о существовании в природе роли окружающей среды в электромагнитных взаимодействиях. Эта роль, по его мнению, противоречит картине действия физических тел друг на друга на расстоянии, принятой сторонниками концепции "*мгновенного дальнего действия*". От опытов с диэлектриками он перешел в 1839 году к исследованию электрического разряда в газах [9, 12]. Он описал различные формы газового разряда при атмосферном давлении и в разряженном состоянии газовой среды между электродами. В стеклянных электроразрядных трубках с пониженным давлением газа он обнаружил темное пространство, разделяющее области свечения у катода и у анода. Эту область сейчас в электрофизике газового разряда называют "*фарадеевой*". Так М. Фарадей с весьма ограниченными на то время техническими возможностями в области проведения физических экспериментов (например, отсутствие мощных высоковольтных источников напряжения и тока) положил начало изучению электрических разрядов в газах, имеющих большое практическое значение для таких современных областей как высоковольтная импульсная техника, слабо- и сильноточная электроника.

7. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ФАРАДЕЯ ПО СОЗДАНИЮ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

М. Фарадей является одним из первых в мире электрофизиков, начавших создавать *слабые импульсные магнитные поля* (ИМП) с помощью указанного в разделе 1 простейшего электромагнита – соленоида [8, 9]. Для создания сильных ИМП в тот исторический период просто еще не было соответствующей мощной сильноточной электрофизической техники. При этом опытные результаты или факты формирования подобных полей внутри соленоидов, намотанных тонким круглым медным проводом в изоляции, фиксировались им путем применения размещенных в их рабочих воздушных объемах стальных иголок [8, 11–13]. При протекании импульсного электрического тока по цилиндрической спирали соленоида создаваемое в нем ИМП намагничивало стальные иголки, в которых появлялся северный и южный магнитные полюсы. Зная в этом случае какой конец иголок стал северным полюсом, М. Фарадей определял и направление протекания тока в соленоиде. По данному направлению он находил и полярность используемого в опытах электрического источника питания (обычно гальванической батареи, фрагмент которой того времени изображен на рис. 1, или иногда природного источника напряжения). Интересно, что однажды в качестве такого естественного живого и просто экзотического источника напряжения им был применен электрический угорь, способный создавать импульс электрического напряжения амплитудой до 500 В при силе импульсного электрического тока на низкоомной нагрузке до 500 А [8, 9]. Отметим, что другие представители морских глубин – гигантские электрические скаты могут создавать в импульсе на поверхности своего тела электрический потенциал до 50 В при амплитуде короткого импульса тока до 50 А [8]. 6 декабря 1838 года М. Фарадей доложил на заседании Лондонского Королевского общества о результатах своих экспериментальных исследований электрического угря, к которому он с помощью своего ассистента в водном аквариуме Британского Королевского института подключал два металлических игольчатых электрода, подсоединенных, в свою очередь, тонкими медными проводниками к указанному выше соленоиду [8, 9]. В ходе этих опытов им было выяснено, что электрические органы угря по принципу накопления энергии и своего действия напоминают электрический конденсатор, изобретенный еще в 1746 году голландским физиком Лейденского университета Мушенбреком в виде исторически так называемой знаменитой "лейденской банки" [7]. Эксперименты М. Фарадея с гальванической батареей или электрическим угрем, электрически подключенными к соленоиду, были первыми известными автору попытками физиков по использованию слабых ИМП для научно-исследовательских целей.

8. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ФАРАДЕЯ ПО СЖИЖЕНИЮ ГАЗОВ

В данном очерке, несмотря на определенное отступление автора от электромагнитной тематики, нельзя хотя бы коротко не упомянуть работы М. Фарадея в области физики по *сжижению газов*. Он ока-

зался в ряду первых исследователей в области физики и техники низких температур. Его самоотверженные работы на несовершенной и порой просто опасной для здоровья исследователя аппаратуре по сжижению газов находятся у истоков научно-технического движения человечества к абсолютному нулю температуры. Используемые им в этих низкотемпературных опытах стеклянные сосуды, трубки и ртутные манометры часто взрывались, испаряя вредные для дыхания человека пары. Именно в этой серии своих экспериментальных физических исследований, по данным историков науки [8, 9], М. Фарадей серьезно ухудшил свое здоровье. Тем не менее, он сумел первым перевести в жидкое состояние некоторые известные на то время газы. Примененная им тогда физическая идея была довольно проста – для сжижения газов необходимо повышать давление в сосуде с газом и одновременно понижать его температуру. Таким техническим приемом он впервые ожил двуокись серы SO_2 , двуокись углерода CO_2 и аммиак NH_3 [8, 9]. После долгих попыток им в 1823 году был так сжижен хлор Cl . В своих опытах он показал, что при технически возможных на то время давлениях до 50 атм. и отрицательных температурах до минус 160 °С ни кислород O_2 , ни водород H_2 , ни азот N_2 сжигать не удается [3, 9]. Справочно заметим, что, например, кислород O_2 был впервые сжижен лишь 2 декабря 1877 года (после смерти М. Фарадея) французским ученым Кальете. Для этого ему потребовалось давление в 320 атм. и температура в 140 градусов ниже 0 °С [8, 9]. Указанные выше экспериментальные работы М. Фарадея явились первыми важными вехами на научно-техническом пути человечества в "страну" вечного холода и конденсированного состояния вещества.

9. ОБЩЕЧЕЛОВЕЧЕСКИЕ КАЧЕСТВА ФАРАДЕЯ И ОБРАЗ ЕГО ЖИЗНИ

Современник М. Фарадея, основоположник теории классической электродинамики Д. Максвелл, называвший себя учеником М. Фарадея, о своем учителе в свое время написал [4, 9]: *"Нужно надеяться, что его благородная, простая и лишенная драматизма жизнь будет так же долго жить в памяти людей, как и обессмертившие его имя открытия. В нем не было жажды одобрения толпы, не было отклонений от любимой, поставленной перед ним цели – **работать, заканчивать, публиковать**".* Другой современник М. Фарадея, французский химик Жан Дюма очень душевно и трогательно написал о нем следующее [4, 9]: *"Его сердечная простота, его искренность, его горячая любовь к истине, его товарищеский интерес ко всем успехам и его искреннее восхищение всеми открытиями других ученых, его природная скромность в отношении собственных открытий, благородство его души, независимой и смелой, – все это вместе придавало образу знаменитого физика несравненное очарование"*. Современные историки науки и техники не так давно пришли к заключению о том, что ранее распространенные у нас штампы о якобы больших трудностях в научной карьере и жизни М. Фарадея не соответствуют действительности. На

основе архивно-исторических данных о социальных и материально-экономических условиях работы М. Фарадея в Британском Королевском институте они считают, что эти условия были вполне благоприятные [3]. Кроме того, они заключают, что скромность образа жизни М. Фарадея была связана не с недостатком у него финансовых средств, а с его религиозными убеждениями. Несмотря на определенную демифологизацию в настоящее время биографии М. Фарадея, его личность как раньше, так и по прошествии вот уже не одного столетия по-прежнему притягивает и завораживает своим величием специалистов из физики, химии, электротехники, электромеханики и истории науки. По мнению автора, весьма поучительны и для нас следующие слова и мысли М. Фарадея [4, 9]: *"В науке только тот заслуживает презрения, кто не находится в постоянном процессе развития"*.

Поразительны были целеустремленность и научная требовательность М. Фарадея. Он говорил [4, 8]: *"Все люди склонны ошибаться"*. Эту мысль он часто любил повторять вслух. Поэтому в ходе научных экспериментальных исследований он неустанно проверял и перепроверял себя, своих помощников и коллег. Судя по дошедшему до нас научному наследию М. Фарадея, он добросовестно публиковал результаты всех своих экспериментальных исследований. При этом он не боялся и не стеснялся писать и о своих неудачах при выполнении тех или иных физических опытов. После неудач он упорно ставил новые опыты, проявлял блестящую техническую изобретательность и настойчиво добивался ожидаемых результатов в области физики и химии. Некоторые из таких опытных исследований продолжались им в течение многих лет к ряду (например, около 11-ти лет по обнаружению явления ЭМИ [9]). Он был, видимо, последним серьезным и авторитетным сторонником тщательного и подробного (буквального) описания исследований, характерных для ученых 18-го столетия. После введения в физику и химию абсолютной системы мер такое описание научных опытов потеряло свою актуальность. Здесь важно подчеркнуть то, что во всех своих исследованиях М. Фарадей руководствовался глубоко нравственными принципами, исключающими возможность выдачи желаемое за действительное. Его высоконравственные качества могут служить положительным примером для ученых разных стран, возрастов, поколений и отраслей науки. Историки науки и техники отмечают, что для М. Фарадея не существовало ничего, кроме науки (семьей он так и не обзавелся) [4, 8, 9]. Как и О. Хевисайд он был убежденным холостяком и всю свою жизнь провел в гордом одиночестве [9, 23]. Наука об электричестве и магнетизме была для него всепоглощающей страстью, которая забирала все его внимание и время. По мнению самого М. Фарадея занятия наукой были ему лучшей наградой в жизни [4, 8, 9]. Знакомясь с биографией и научными достижениями великого электрофизика М. Фарадея, приходишь к выводу о том, что этот гениальный от природы человек все свои научные знания и техническое мастерство приобрел исключительно за счет напряженного самообразования и самосовершенствования. Несмотря на данное обстоятельство, безусловно наложившее свой отпечаток на

его подходы к решаемым научным задачам и форме представления их экспериментальных решений, дошедшие до нас архивные и научные материалы свидетельствуют о его поразительной конкретности, простоте, ясности и физичности излагаемых им мыслей, а также о глубине проработки и обсуждения изучаемых им электрических и магнитных явлений [6, 8, 9, 11–13]. М. Фарадей является примером бескорыстного служения науке. О его признании в научном мире говорит то, что гениальный английский физик М. Фарадей был членом большого ряда всемирно известных научных обществ: Лондонского Королевского общества, Санкт-Петербургской (Российской), Парижской и более десятка других академий. Кроме того, в физике единице электрической емкости C в память об М. Фарадее и в честь его научных заслуг присвоено название **Фарада** (сокращенно **Ф**) [10]. Известный российский физик Столетов А.Г. в конце 19-го века, подчеркивая величие М. Фарадея как ученого, сказал о нем следующее [9, 14]: "*Никогда со времен Галилея свет не видал столько поразительных и разнообразных открытий, вышедших из одной головы*". Отмечая важную научную роль М. Фарадея в истории человечества, известный немецкий физик Г. Гельмгольц сказал [9,14]: "*До тех пор пока люди пользуются благами электричества, они всегда будут с благодарностью вспоминать имя Фарадея*". Изнурительный многолетний научный труд, в конце концов, окончательно подорвал его здоровье. Свой жизненный путь он закончил в доме для престарелых в Хэмптон-Корте (бывшем Королевском дворце, расположенном в предместье г. Лондона), организованном для знаменитых людей Англии. Скончался великий электрофизик М. Фарадей 25 августа 1867 года в возрасте 76-ти лет и был с большими почестями похоронен на Хайгетском кладбище г. Лондона (там же и могила выдающегося немецкого ученого в области общественных наук Карла Маркса).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максвелл Д.К. Фарадей / В кн.: Максвелл Д.К. Статьи и речи. Пер. с англ. под ред. В.Ф. Миткевича.– М. – Л.: Гостехиздат, 1940. – 218 с.
2. Академик Игорь Евгеньевич Тамм / Сборник статей.– М.: Знание, 1982.– 336 с.
3. Лежнева О.А. На Фарадеевской конференции // Электричество.– 1992.– №4.– С. 63–65.
4. Нетушил А.В. Фарадей и проблемы современной электротехники // Электричество.– 1992.– №4.– С. 1–4.
5. Шнейберг Я.А. Научный подвиг Майкла Фарадея // Электричество.– 1991.– №8.– С. 67–69.
6. Выдающиеся физики мира. Рекомендательный указатель / Научн. ред. Б.Г. Кузнецов.– М.: Типография Б-ки им. В.И. Ленина, 1958. –436 с.
7. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. В 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира.– Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
8. Карцев В.П. Новеллы о физике.– М.: Знание, 1969.–104 с.
9. Кудрявцев П.С. Курс истории физики.– М.: Просвещение, 1974.– 312 с.
10. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.– Киев: Наукова думка, 1989.– 864 с.
11. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Том 1 / Пер. с англ. Е.А. Чернышевой и Я.Р. Шмидт-Чернышевой под ред. Т.П. Кравца.– М.: Изд-во АН СССР, 1947.– 848 с.

12. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Том 2 / Пер. с англ. А.В. Яковлевой под ред. Т.П. Кравца.– М.: Изд-во АН СССР, 1951.– 538 с.
13. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Том 3 / Пер. с англ. Е.А. Чернышевой и Я.Р. Шмидт-Чернышевой под ред. Т.П. Кравца.– М.: Изд-во АН СССР, 1959.– 646 с.
14. Боев В.М. К 175-летию опубликования первой серии "Экспериментальных исследований по электричеству" Майкла Фарадея // Электротехника і електромеханіка.– 2004.– №3.– С. 5–7.
15. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004.– 958 с.
16. Крыжановский Л.Н. Электростатическая индукция и электрофор в опытах XVIII в. // Электричество.– 1992.– №4.– С. 60–62.
17. Баранов М.И. Эмилий Христианович Ленц – один из основоположников науки об электромагнетизме // Электротехника і електромеханіка.– 2006.– №3.– С.5–11.
18. Баранов М.И. Джеймс Клерк Максвелл и теория электромагнитного поля // Электротехника і електромеханіка.– 2005.– №1.– С. 5–7.
19. Баранов М.И. Генрих Рудольф Герц – первооткрыватель электромагнитных волн // Электротехника і електромеханіка.– 2006.– №1.– С. 5–11.
20. Карцев В.П. Максвелл / Серия: Жизнь замечательных людей.– М.: Молодая гвардия, 1976.–336 с.
21. Карцев В.П. Приключения великих уравнений.– М.: Знание, 1978.– 224 с.
22. Мигулин В.В. Фарадей и физика // Электричество.– 1992.– №4.– С. 5–6.
23. Баранов М.И. Оливер Хевисайд и его вклад в мировую сокровищницу науки // Электротехника і електромеханіка.– 2005.– №4.– С. 5–14.
24. Боев В.М., Грибская Е.А., Лавриненко О.В. "Электроотрицательное состояние" и закон электромагнитной индукции Фарадея // Электротехника і електромеханіка.– 2004.– №4.– С. 5–8.
25. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. I–II.– Oxford: Clarendon Press, 1873.– 1011 p.
26. Максвелл Д.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля.– М.: Гослитиздат, 1954.– 687 с.

Поступила 29.09.2009

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.
НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ".
Тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

Michael Faraday and his scientific accomplishments in the face of humanity

A brief outline from the history of electricity is given on the main fundamental achievements of the great English physicist Michael Faraday in field of electromagnetism.

Key words – outline, electricity, magnetism, physical experiment, electromagnetic induction

В.Г. Дёгтев, А.В. Бабушанов, Я.А. Чеснов

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ СИНХРОННОГО НЕЯВНОПОЛЮСНОГО ГЕНЕРАТОРА

Проведені дослідження магнітного поля експериментального зразку неявнополюсного синхронного генератора у режимі неробочого ходу. Виконаний порівняльний аналіз кривих розподілу магнітного поля у повітряному зазорі, отриманих експериментально і із використанням методу кінцевих елементів.

Проведены исследования магнитного поля экспериментального образца неявнополюсного синхронного генератора в режиме холостого хода. Выполнен сравнительный анализ кривых распределения магнитного поля в воздушном зазоре, полученных экспериментально и с применением метода конечных элементов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из важнейших показателей синхронных генераторов является коэффициент искажения синусоидальности K , определяющий уровень содержания добавочных гармоник в кривой выходного напряжения [1].

Форма кривых напряжения на зажимах генератора в значительной степени зависит от особенностей распределения магнитного поля в воздушном зазоре. Поэтому при проектировании генераторов получение достоверной информации о характере распределения индукции в воздушном зазоре $B\delta(\alpha)$ [2, 3] или потокоцепления [4, 5] является актуальной задачей.

Современные программные и аппаратные средства позволяют определить распределение магнитного поля с применением метода конечных элементов. Однако при непосредственном их применении для анализа магнитного поля следует учитывать два обстоятельства. Во-первых, несмотря на значительные возможности современных аппаратных средств необходимо рационально подходить к выбору степени дискретизации конечных элементов, сохраняя при этом приемлемое соответствие расчетной картины поля действительности. Во-вторых, в неявнополюсных генераторах при наличии двухсторонней зубчатости и взаимном перемещении ротора и статора каждому варианту их взаимного расположения в пределах половины зубцового деления якоря соответствует оригинальный характер распределения и гармонического состава магнитного поля. Поэтому необходима отработка алгоритма выбора шага взаимного перемещения статора и ротора для получения интегральной картины поля.

Оценку корректности подхода к решению поставленной выше задачи и адекватности получаемых результатов можно выполнить только при сопоставлении последних с экспериментальными данными.

Для решения этой задачи используем сравнение результатов расчетов магнитного поля возбуждения методом конечных элементов в среде FEMM (Finite Element Method Magnetics) [6, 7] и экспериментальных исследований опытного образца синхронного неявнополюсного генератора.

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА

В 30 пазах ротора экспериментального генератора уложена специальная обмотка возбуждения, которая позволяет получить двухполюсное магнитное по-

ле и два варианта поля с числом полюсов $2p=6$.

Распределение токов каждого варианта (рис. 1) теоретически обеспечивает генерацию полей, кривые которых обладают симметрией первого рода [8]. Это должно приводить к исключению содержания в их гармоническом спектре гармоник четных порядков.

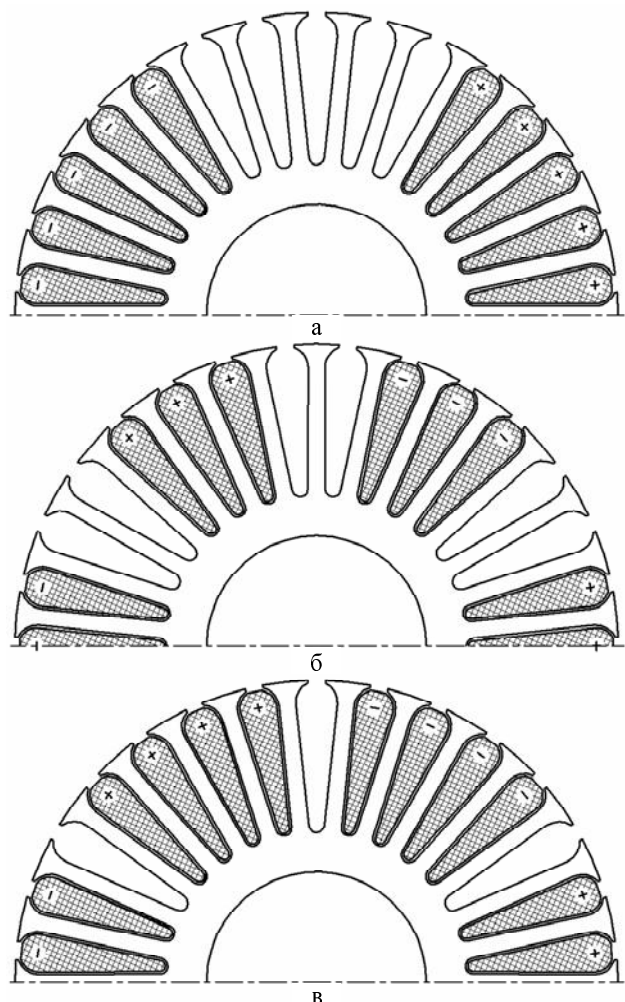


Рис. 1. Распределения токов обмотки возбуждения для двухполюсного (а) и вариантов шестиполюсного поля (б, в)

Для экспериментальной регистрации кривых ЭДС, адекватно отображающих распределение магнитного поля возбуждения, в 36 пазах статора уложена измерительная обмотка с шагом $y=18$. Размеры магнитной системы образца приведены на рис. 2.

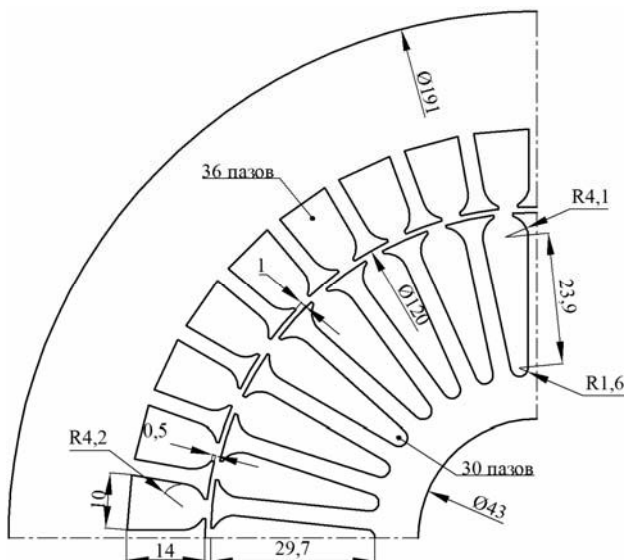


Рис. 2. Магнитная система опытного образца

Шаг измерительной обмотки является диаметрально относительно как двухполюсных, так и шестиполюсных полей, что обеспечивает одинаковое потокоцепление со всеми гармоническими нечетными порядками. Для приема и обработки сигнала указанной обмотки использован цифровой осциллограф BORDO, предназначенный для исследования формы и измерения параметров периодических и однократных электрических сигналов.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для кривых распределения индукции, полученных как расчетным путем, так и экспериментально, характерно наличие ряда гармоник, которыми следует пренебречь. В расчетных кривых наличие таких гармоник вызвано уровнем дискретизации конечных элементов в программе FEMM, используемой в электромагнитных расчетах электрических машин. В экспериментальных кривых причиной проявления гармоник такого рода является нестабильность щеточно-контактного взаимодействия. Кроме того, в экспериментальных кривых возможно проявление гармоник, вызванных конструктивной и технологической несимметрией, нелинейностью преобразователей, датчиков и т.д.

С учетом этих обстоятельств обработка как экспериментальных, так и расчетных кривых выполнена с помощью специально разработанной программы FOURIER, рабочее окно которой приведено на рис. 3.

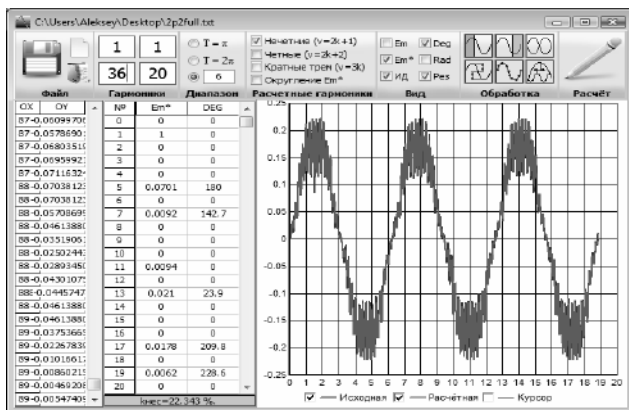


Рис. 3. Окно программы FOURIER

Программа FOURIER реализована в среде DELPHI, осуществляет разложение кривых в ряд Фурье, позволяет выполнять гармонический анализ на любом числе полупериодов. Помимо определения амплитуд и фаз гармонических составляющих с порядками в диапазоне от 0 до произвольного заданного порядка, программа выполняет расчет относительных амплитуд, расчет коэффициента K искажения синусоидальности исходной, выполняет визуализацию сопоставления исходной и построенной по результатам разложения кривых, а также предоставляет возможность передачи информации в среду Excel для последующей обработки. Кроме того, программа позволяет обрабатывать исходную кривую: удалять выбранные точки, выравнивать ординаты точек относительно оси абсцисс, исключать из результатов разложения определенные части спектра, корректировать угловые координаты гармоник для кривых с симметрией первого рода и т.д.

При анализе осциллограмм, пример одной из которых представлен на рис. 4, установлена нестабильность сигнала по периодам.

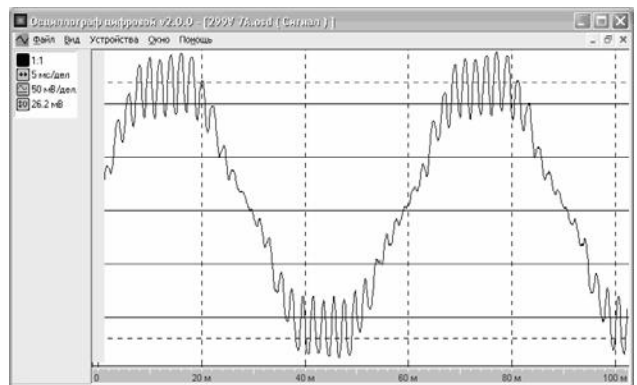


Рис. 4. Осциллограмма распределения индукции в воздушном зазоре генератора при $2p=2$

Так, результаты обработки каждого из периодов программой FOURIER, представленные в табл. 1, показали, что относительная разница амплитуд отдельных гармоник ΔB_v может достигать 120%. В то же время максимальное относительное различие в значениях коэффициентов искажения ΔK не превышает 3%.

Таблица 1

Сравнение результатов обработки осциллограммы

v	B_v^* по периодам, о.е.					$B_{вср}$	$\Delta B_v, \Delta K$
	B_{v1}^*	B_{v2}^*	B_{v3}^*	B_{v4}^*	B_{v5}^*		
5	0,073	0,066	0,068	0,071	0,073	0,070	0,094
7	0,009	0,012	0,011	0,008	0,008	0,010	0,477
11	0,007	0,012	0,013	0,009	0,010	0,010	0,578
13	0,023	0,022	0,020	0,019	0,018	0,020	0,236
17	0,019	0,019	0,019	0,018	0,017	0,018	0,066
25	0,021	0,020	0,020	0,017	0,017	0,019	0,209
29	0,161	0,161	0,168	0,159	0,163	0,162	0,028
31	0,126	0,127	0,128	0,130	0,127	0,128	0,034
35	0,021	0,018	0,019	0,020	0,014	0,018	0,385
37	0,013	0,014	0,017	0,018	0,011	0,015	0,457
K	0,222	0,221	0,227	0,222	0,223	0,223	0,027

Поэтому основным критерием адекватности расчетных и экспериментальных результатов были выбраны коэффициенты искажения синусоидальности и формы кривых K .

$$K = \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} B_{\delta v}^{*2}},$$

где $B_{\delta v}^*$ – относительная амплитуда гармоник кривой распределения индукции в воздушном зазоре экспериментального генератора.

В общем случае рациональный уровень дискретизации при моделировании в среде FEMM зависит от соотношения величин рабочего воздушного зазора δ , пазового деления t_z и полюсного деления τ и требует специальных исследований для различных конфигураций рабочей области. Применительно к конкретной геометрии экспериментального образца проведен ряд расчетных исследований, позволивших выработать некоторые рекомендации по определению этого уровня.

Гармонический анализ кривых, полученных в среде FEMM с разным числом N узлов расчетной сетки в воздушном зазоре, показал, что с ростом N происходит изменение как амплитуд, так и фаз гармоник. Поэтому предельный уровень дискретизации целесообразно связать с относительным изменением этих величин.

Минимально допустимое число узлов N_{\min} сетки можно определить, используя моделирование кривых, обладающих симметрией первого рода. Если результат разложения при этих условиях кривых в ряд Фурье обеспечивает равенство аргументов произвольных гармоник нулю или ста восьмидесяти градусам, то такой уровень дискретизации можно считать минимально приемлемым.

При определении рационального уровня дискретизации число узлов N сетки конечных элементов можно определить, построив зависимость относительного изменения амплитуд ΔB_v наиболее весомых гармоник от N .

В качестве примера такие расчетные зависимости построены для трех наиболее весомых гармоник ($v=5, v=29, v=31$) индукции двухполюсного поля экспериментального образца и приведены на рис. 5.

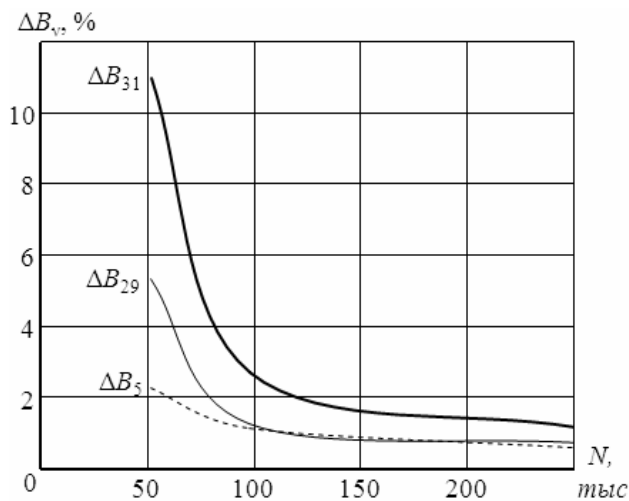


Рис. 5. Зависимость $\Delta B_v = f(N)$

Как следует из графиков этого рисунка, при увеличении числа узлов расчетной сетки относительное изменение амплитуд наиболее весомых гармоник имеет экспоненциальный характер и позволяет выбирать N в зависимости от необходимой точности расчета.

После выбора N было проведено исследование влияния взаимного положения статора и ротора двухполюсного генератора в режиме холостого хода на характер распределения индукции в воздушном зазоре.

Программа FEMM позволяет получить распределение нормальной по отношению к выбранному контуру индукции в воздушном зазоре для заданного числа точек контура. Типичный результат такого расчета для одного из произвольных взаимных положений статора и ротора приведен на рис. 6, картина распределения магнитных силовых линий для соответствующего положения приведена на рис. 7.

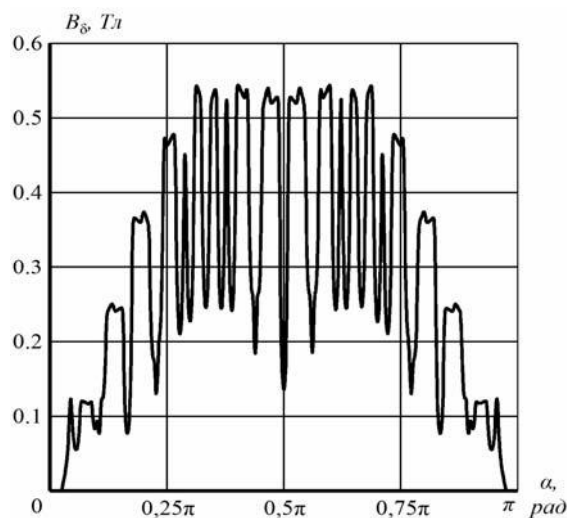


Рис. 6. Зависимость $B_{\delta} = f(\alpha)$ по расчету в среде FEMM

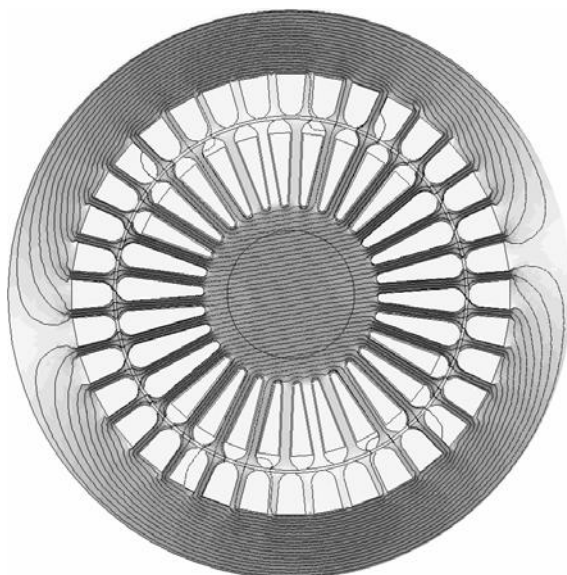


Рис. 7. Распределение двухполюсного варианта магнитного поля

Как следует из сопоставления графиков на рисунках 4 и 6 форма расчетной кривой (рис. 6) резко отличается от экспериментальной зависимости (рис. 4). Причиной указанного расхождения является разный характер кривых. Экспериментальная кривая является интегральным результатом, учитывающим

все возможные варианты взаимного расположения ротора и статора на протяжении периода. Расчетная зависимость отображает только одно выбранное из множества возможных взаимных расположений статора и ротора.

Для получения интегральной расчетной кривой пространственного распределения магнитного поля в воздушном зазоре необходимо выполнить расчёты для каждого из возможных вариантов взаимного расположения ротора и статора. Затем значения индукции интегральной кривой определяются, как среднее арифметическое от значений индукции каждого расчета в соответствующих координатах α .

Как экспериментальные, так и расчетные интегральные кривые $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$ генератора обработаны с помощью программы FOURIER. Обработка заключалась в исключении теоретически отсутствующих гармоник (четных и кратных 3), а также гармоник, относительные амплитуды которых составляли менее 1%. Гармоники, кратные трем отсутствуют, поскольку обмотка возбуждения занимает 2/3 пазов ротора и не генерирует их. Указанные допущения позволили ограничить максимальный порядок учитываемых гармоник первыми зубцовыми и статора ($\nu=35, \nu=37$).

Изложенная выше методика была применена при обработке расчетов в среде FEMM для вариантов взаимного расположения статора и ротора при угловом смещении $\Delta\alpha=1^\circ$.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сопоставление форм интегральных кривых $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$, построенных по результатам разложения экспериментальной и расчетной характеристик в относительных единицах при двухполюсном возбуждении приведено на рис. 8.

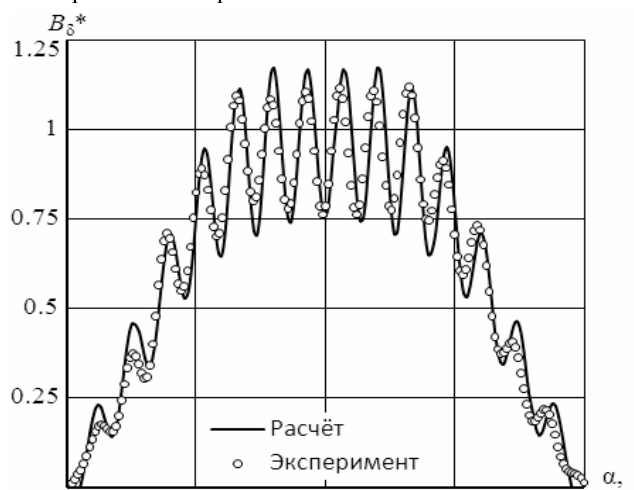


Рис. 8. Сравнение форм экспериментальной и расчетной интегральных кривых $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$ ($\Delta\alpha=1^\circ$)

По результатам разложения в ряд Фурье расчетной и экспериментальной кривых значения коэффициентов искажения синусоидальности K составляют $K_p=0,1783, K_{\text{э}}=0,1794$, соответственно. Отличие составляет 0,6%, а значит можно считать, что расчетная кривая распределения магнитного поля соответствует

действительной с допустимой погрешностью.

Установлено, что расчетные интегральные кривые $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$, полученные по двум произвольным взаимным положениям статора и ротора и предыдущий результат после обработки по предложенной методике полностью идентичны. Рассмотренные положения отличаются тем, что ротор одного из них смещен на половину зубцового деления статора, относительно другого. Это позволяет при последующих расчетах ограничиваться рассмотрением только двух таких характерных положений.

Аналогично двухполюсному полю выполнено сравнение эксперимента и расчета характеристик для двух вариантов шестиполюсного поля. Здесь следует отметить, что в этом случае меняется соотношение величин рабочего воздушного зазора δ , пазового деления t_z и полюсного деления τ . Это обстоятельство потребовало корректировки в процессе обработки расчетных интегральных кривых $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$ программой FOURIER. Оказалось, что, несмотря на проявление в расчетных интегральных кривых вторых зубцовых гармоник статора и ротора ($\nu=19, 21, 23, 25$), в соответствующих экспериментальных кривых указанные гармоники не проявляются. Поэтому предельный относительный порядок в данном случае ограничен первыми зубцовыми гармониками.

Сравнение экспериментальных и расчетных кривых распределения магнитного поля в воздушном зазоре, построенных по результатам разложения в ряд Фурье приведено на рис. 9 и 10. Коэффициенты искажения синусоидальности расчетных и экспериментальных интегральных кривых, представленных на рис. 9, 10, для первого варианта составляют $K_p=0,233, K_{\text{э}}=0,234$ ($\Delta K=0,004$), а для второго – $K_p=0,247, K_{\text{э}}=0,25$ ($\Delta K=0,012$).

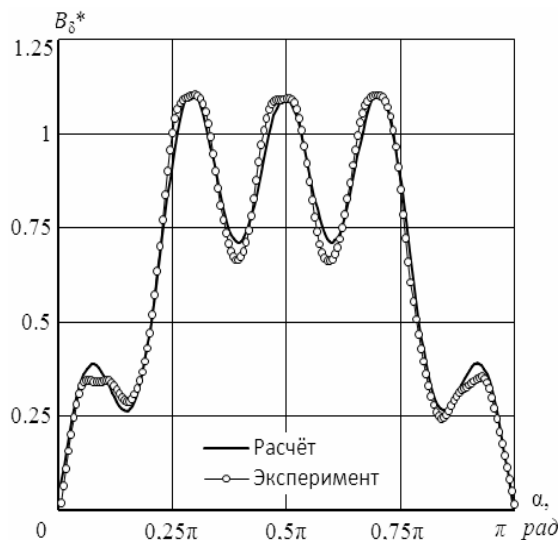


Рис. 9. Сравнение интегральных кривых $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$ первого варианта шестиполюсного генератора

Графическое сопоставление характеристик, приведенных на рис. 9 и 10 показывает их хорошую сходимость.

Картины распределения магнитных силовых линий для представленных вариантов шестиполюсного поля приведены на рис. 11 и 12.

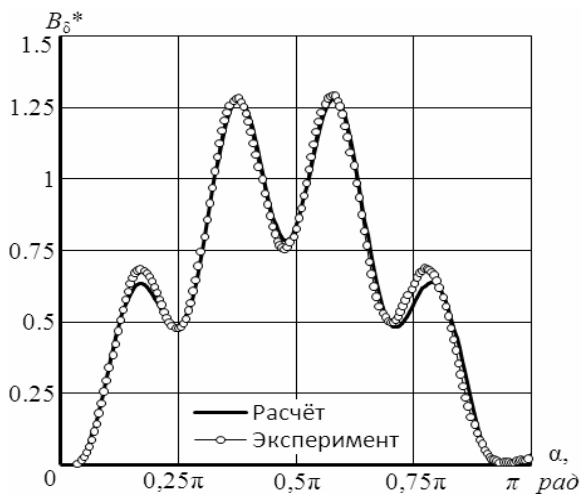


Рис. 10. Сравнение интегральных кривых $B_{\delta_i}^* = f(\alpha)$ второго варианта шестиполюсного генератора

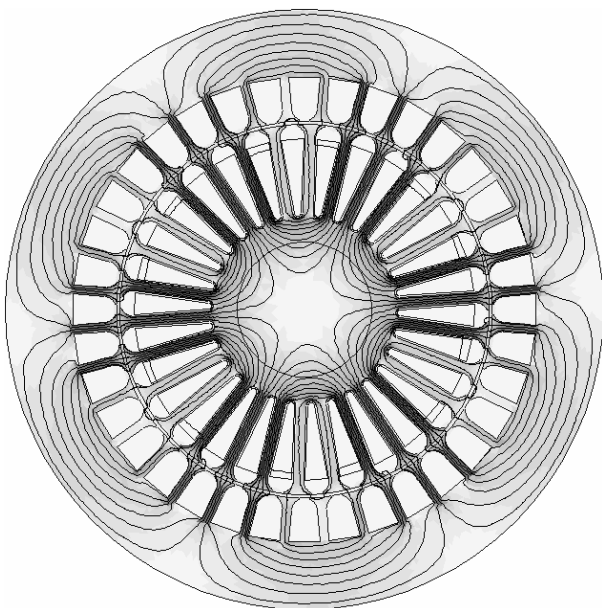


Рис. 11. Распределение магнитного поля при $2p=6$ согласно рис. 1, б

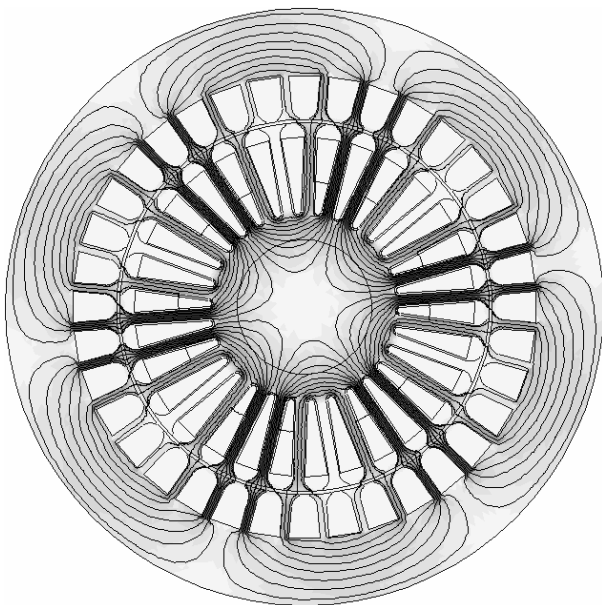


Рис. 12. Распределение магнитного поля при $2p=6$ согласно рис. 1, в

ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют рекомендовать предложенную технологию обработки расчетных и экспериментальных результатов для продолжения исследований магнитных полей генераторов при различных нагрузках и уровнях насыщения, в условиях совмещения магнитных полей с разными числами полюсов и т.д.

В конечном итоге это обеспечит возможность достоверного определения форм кривых фазного и линейного напряжений и соответствующих значений коэффициентов искажения синусоидальности в процессе проектирования генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.- 832 с.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч.2- Машины переменного тока. Л.: Энергия, 1973. - 648 с.
4. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ характера ЭДС, вызываемых реакцией якоря в турбогенераторе // Вісник Національного університету "Львівська політехніка", №487, Електроенергетичні та електромеханічні системи. Львів: НУ "ЛП", 2003. - С. 10-17.
5. Милых В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ ЭДС в турбогенераторе на основе численных расчетов вращающихся магнитных полей в различных режимах // Електротехніка і електромеханіка. - 2004.-№4. - С. 46-51.
6. David Meeker. Finite Element Method Magnetics. <http://femm.foster-miller.net/>
7. David Meeker. Finite Element Method Magnetics. Users Manual. Version 4.2. 2006. – 155 p.
8. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989.- 400 с.

Поступила 16.07.2009

Дёгтев Владимир Григорьевич, д.т.н., проф.
тел. (048) 776-29-78, e-mail: kem.deg@gmail.com
Бабушанов Алексей Викторович
тел. 8-063-774-25-58, e-mail: kem.abv@gmail.com
Чеснов Ярослав Александрович
тел. 8-096-55-65-291, e-mail: chesnov2007@ukr.net
Одесский национальный политехнический университет
Украина, 65058, Одесса, пр-т Шевченко, 6/2, кв. 70,

V.G. Degtev, A.V. Babushanov, Y.A. Chesnov

Synchronous generators air gap magnetic field analysis

Research on magnetic field of a synchronous implicit-pole generator operative embodiment is performed for no-load conditions. Comparative analysis of magnetic field distribution curves in the air gap obtained experimentally and analytically is made.

Key words – magnetic field distribution, synchronous generator, finite element method, superior harmonics, Fourier series

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ЗАЗОРЕ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНОЙ ОБМОТКОЙ НА БЕГУНЕ

Описан разработанный стенд для испытания линейных электродвигателей и приведены измеренные характеристики магнитного поля в зазоре коаксиально-линейного асинхронного двигателя с фазной обмоткой на бегуне. Выполнен расчет численным методом конечных элементов по программе FEMM магнитной индукции в зазоре этого двигателя и показано хорошее согласие с результатами эксперимента.

Розроблено стенд для випробування лінійних двигунів та приведено характеристики магнітного поля в зазорі коаксиально-лінійного асинхронного двигуна з фазною обмоткою на бігуні. Проведено розрахунок чисельним методом кінцевих елементів за програмою FEMM магнітної індукції в зазорі цього двигуна та одержано задовільне узгодження з результатами експерименту.

Введение. Применение коаксиально-линейного асинхронного электродвигателя (ЛАД) для привода рабочего органа строительных машин возвратно-поступательного движения, например, толкателей, разъединителей, ударных механизмов и т.д. [1,2,3,4,8], является актуальной задачей.

В настоящее время широко используется ЛАД с короткозамкнутой обмоткой на бегуне [4]. Как известно, такого типа двигатели не позволяют увеличить пусковое тяговое усилие, а также уменьшить пусковой ток при номинальном напряжении.

Исследуемый линейный асинхронный двигатель с фазной обмоткой на бегуне изображен на рис. 1, где 1 - статор ЛАД, 2 - магнитопровод статора, 3 - обмотка статора, 4 - магнитопровод бегуна, 5 - обмотка бегуна, уложенная в паз.

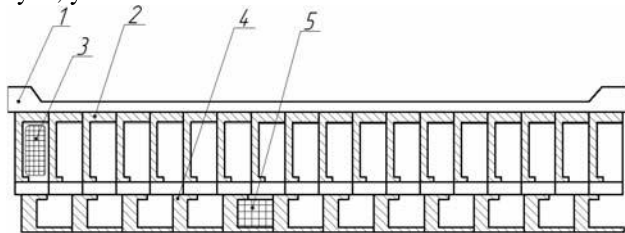


Рис. 1. Схематическое изображение ЛАД с фазной обмоткой на бегуне

Существующие в настоящее время методы и стенды для исследования недостаточно эффективны при снятии экспериментальных величин, например, магнитной индукции в зазоре, а также электромеханических характеристик двигателя [4,7,8].

Наряду с методами экспериментального исследования электромеханических характеристик и параметров электрической машины, в последнее время все более широко применяется численный метод конечных элементов [5]. Этот метод может быть использован и для расчета магнитной индукции в зазоре ЛАД с фазной обмоткой на бегуне.

Целью данной работы является анализ распределения магнитной индукции в зазоре ЛАД с фазной обмоткой на бегуне методом конечных элементов на программе FEMM, а также разработка методики экс-

периментального исследования магнитного поля в зазоре ЛАД.

Для испытания линейного асинхронного двигателя был разработан экспериментальный стенд (рис. 2). Стенд включает: 1 - линейный асинхронный двигатель, 2 - милливольтметр (МВ) В3-57, персональный компьютер (ПК) и принтер (Пр), 3 - электропривод (М) подвижной рамки с индуктивным датчиком (ИД).

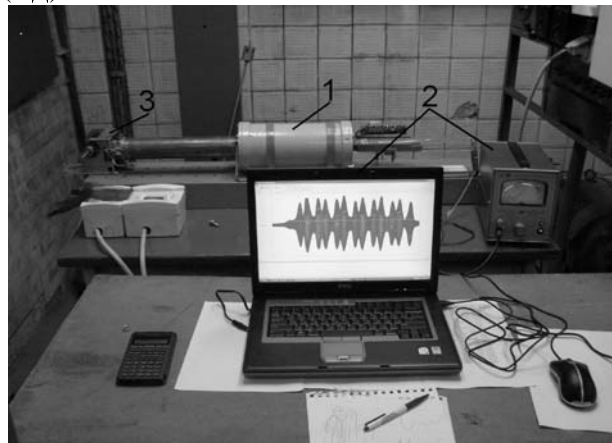


Рис. 2. Стенд для испытания линейного асинхронного электродвигателя с фазной обмоткой на бегуне

Расчетное и экспериментальное исследование ЛАД. Исследуемый линейный асинхронный двигатель имеет следующие характеристики и конструктивные параметры: номинальная мощность $P_2=1500$ Вт; подводимое напряжение $U_\phi=127$ В; частота сети $f=50$ Гц; пусковой ток $I_n=10$ А; электромагнитное тяговое усилие $F_{эм}=300$ Н; масса статора $m_1=19,2$ кг; масса бегуна $m_2=13,6$ кг; немагнитный зазор $\delta=2,5$ мм; число витков фазы статорной обмотки $W_1=80$; сечение проводника $\Delta S_{ст}=1,12$ мм²; схема соединения катушек обмотки статора соответствует схеме АЗЗВХХСУУ. Число витков фазной обмотки бегуна $W_2=200$; сечение проводника $\Delta S_{фч}=0,69$ мм²; а схема соединения фазных обмоток бегуна – звезда abcхуз.

Одной из основных величин, определяющих тяговое усилие ЛАД, является величина магнитной индукции B_δ в воздушном зазоре между статором и бегуном. Для расчета магнитной индукции в работе ис-

пользовался численный метод конечных элементов, реализованный в программе FEMM [5].

Задача по расчету магнитного поля в зазоре ЛАД решалась в цилиндрической системе координат в плоскости roz , для векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}}$, имеющего единственную φ – компоненту [6].

Из системы дифференциальных уравнений Максвелла для квазистационарного магнитного поля в комплексном виде

$$\begin{aligned} \text{rot} \dot{\mathbf{H}} &= \dot{\mathbf{J}}, & \text{rot} \dot{\mathbf{E}} &= -j\omega \dot{\mathbf{B}}, \\ \text{div} \dot{\mathbf{B}} &= 0, & \text{div} \dot{\mathbf{J}} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

и уравнения состояния для магнитного материала, записанного в виде

$$\dot{\mathbf{B}} = \mu_{\text{eff}}(\mathbf{B}) \dot{\mathbf{H}}, \quad \dot{\mathbf{J}} = \sigma [\dot{\mathbf{E}} + \text{rot} \dot{\mathbf{A}}], \quad (2)$$

уравнение для векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}}$, $\dot{\mathbf{B}} = \text{rot} \dot{\mathbf{A}}$ при неподвижном бегуне ($\mathbf{v} = 0$) имеет вид [9]

$$\text{rot} \times \left(\frac{1}{\mu_{\text{eff}}(\mathbf{B})} \cdot \text{rot} \dot{\mathbf{A}} \right) = -j\omega \sigma \dot{\mathbf{A}} + \dot{\mathbf{J}}_{\text{стр.}} \quad (3)$$

Здесь $\dot{\mathbf{E}}$ – напряженность электрического поля, В/м; $\dot{\mathbf{H}}$ – напряженность магнитного поля, А/м; $\dot{\mathbf{B}}$ – магнитная индукция, Тл; $\dot{\mathbf{J}}_{\text{стр.}}$ – плотность тока в обмотке статора и бегуна, А/мм² (определялась по измеренным значениям тока); $\mu_{\text{eff}}(\mathbf{B})$ – эффективная магнитная проницаемость, зависящая от \mathbf{B} , Г/м; j – мнимая единица; ω – угловая частота, рад/с; σ – удельная электрическая проводимость массивных элементов двигателя, См/м.

На рис. 4, б показана расчетная кривая распределения магнитной индукции в зазоре между статором и бегуном исследуемого ЛАД.

Для подтверждения расчетных значений магнитной индукции было проведено экспериментальное исследование на стенде = см. рис. 2, блок-схема которого показана на рис. 3. На этой блок-схеме обозначены: линейный асинхронный двигатель 1; электропривод (М) подвижной рамки 3 с индуктивным датчиком (ИД); автотрансформатор (АТр); комплект измерительных приборов К-51; милливольтметр (МВ) В3-57; персональный компьютер (ПК) и принтер (Пр), а также автоматические выключатели $QF1$, $QF2$, $QF3$.

Включение и отключение подачи электрической энергии для питания ЛАД, привода М подвижной рамки с датчиком ИД и контролирующей аппаратуры осуществляется при помощи автоматических выключателей $QF1$, $QF2$ и $QF3$ при соответствующей технологической последовательности проведения испытания ЛАД.

Индуктивный датчик (ИД) (см. рис.3) закреплен на текстолитовой ленте подвижной рамки 3. Датчик ИД имеет $W_{\text{им}}=10$ витков, уложенных в виде квадратной катушки размером $\Delta S_{\text{ид}}=10 \times 10 \text{ мм}^2$.

Концы индуктивного датчика ИД подключены к милливольтметру В3-57 и персональному компьютеру ПК.

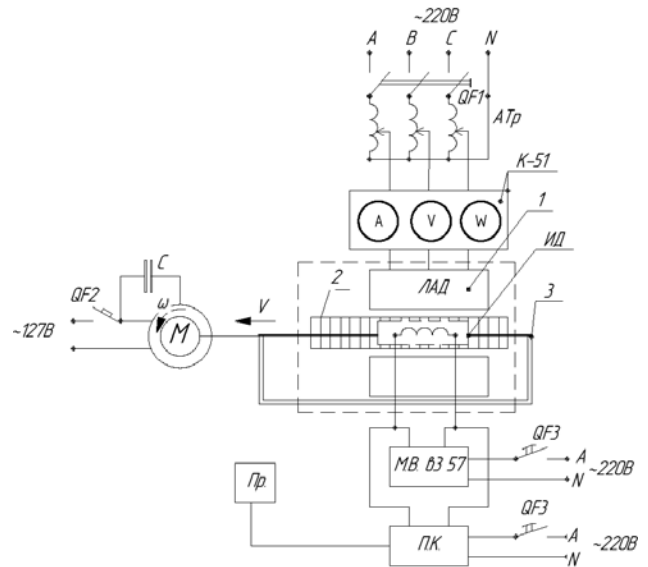


Рис. 3. Блок-схема электрическая стенда для испытания ЛАД

При измерении распределения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя датчик ИД непрерывно перемещался в этом зазоре с помощью привода М подвижной рамки. Исследования ЛАД проводились в режиме короткого замыкания, т.е. при заторможенном бегуне. Датчик ИД был протарирован согласно [9], а также с применением некоторых рекомендаций из [10,11] по определению магнитной индукции.

Известно [10], что действующее значение ЭДС в индуктивном датчике ИД может быть определено из выражения

$$E_{\text{ид}} = 4,44 f_1 W_{\text{ид}} \Phi_{\text{max}}, \quad (4)$$

где f_1 – частота сети, Гц; $W_{\text{ид}}$ – число витков индуктивного датчика ИД; Φ_{max} – максимальное значение магнитного потока, Вб. Отсюда, величина магнитного потока Φ_{max} будет равна

$$\Phi_{\text{max}} = \frac{E}{4,44 f_1 W_{\text{ид}}}, \quad (5)$$

а значение магнитной индукции B_{δ} равно

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\text{max}}}{\Delta S_{\text{ид}}}, \quad (6)$$

где $\Delta S_{\text{ид}}$ – площадь катушки индуктивного датчика ИД, м².

При прохождении переменного тока по обмоткам статора возникает бегущее магнитное поле, которое своими силовыми линиями пересекает обмотку индуктивного датчика ИД и наводит ЭДС $E_{\text{ид}}$.

Величина этой ЭДС фиксируется на шкале милливольтметра В3-57. Полученные значения магнитной индукции автоматически обрабатываются на персональном компьютере ПК, а их распечатка осуществляется на принтере Пр. Картина распределения магнитной индукции B_{δ} вдоль зубцовой зоны Z статора отображается на дисплее персонального компьютера.

График распределения магнитной индукции вдоль зубцовой зоны статора $B_{\delta}=f(Z)$, полученный экспериментально, приведен на рис.4б.

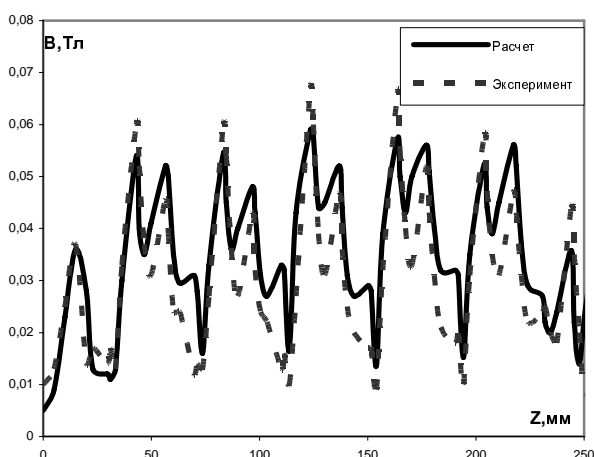


Рис.4. Графики распределения магнитной индукции вдоль зубцовой зоны статора $B_{\delta}=f(Z)$ – по результатам расчета и эксперимента

По данным рис.4) можно заключить следующее: среднеквадратичное расхождение экспериментальных и расчетных значений магнитной индукции не превышает 15%; провалы на графиках $B_{\delta}=f(Z)$ обусловлены зубцовой структурой магнитопровода статора и бегуна ЛАД; в краевых зонах активной части магнитопровода статора магнитное поле ослабевает из-за разрыва магнитной цепи. Максимальное значение индукции в воздушном зазоре B_{δ} получено в средней зоне магнитопровода статора и составляет 0,07 Тл.

Выводы. Разработана методика расчета магнитного поля в зазоре ЛАД с фазной обмоткой на бегуне с использованием численного метода конечных элементов. Результаты проведенных расчетов хорошо совпадают с экспериментальными данными - среднеквадратичное расхождение не превышает 15%.

Разработан стенд и методика испытания линейных асинхронных электродвигателей с фазной обмоткой на бегуне, позволяющие в автоматическом режиме получать распределение магнитной индукции в зазоре B_{δ} по длине статора, а также исследовать электрохимические характеристики линейного двигателя.

Полученные результаты работы по исследованию ЛАД с фазной обмоткой на бегуне могут быть использованы для усовершенствования конструкции линейного асинхронного двигателя и повышения эффективности его использования в качестве привода возвратно – поступательного движения, в частности, в строительных машинах и механизмах ударного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на корисну модель № 23757 Богаєнко Е.М., Богаєнко М.В., Веремієнко А.В., Голенков Г.М., Попков В.С., Електродвигун зворотньо-поступального руху. Україна Оpubл. від 11.06.2007.
2. Декларацийний патент на корисну модель заявка № а 2006 13644 Богаєнко Е.М., Богаєнко М.В., Веремієнко А.В., Голенков Г.М., Попков В.С., Електродвигун зворотньо-поступального руху. Україна Оpubл. від 22. 12. 2006.

3. А.С. №137579 (СССР). Голенков Г.М. и др. Электромагнитный молот для забивки свай. Оpubл. В БИ №7 1998.
4. Веселовский О.Н. Линейные асинхронные двигатели. М. Энергоатомиздат, 1991. 256с.
5. <http://femm.foster-miller.net>
6. Голенков Г.М., Веремеєнко А.В. Оптимизация параметров линейного асинхронного двигателя с токопроводящим слоем на бегуне методом конечных элементов."Электротехника и электромеханика". Научно – практический журнал. Харків. НТУ "ХПИ" №5, 2007 с. 9–12.
7. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. Л. Энергоатомиздат, 1983. 180 с
8. Патент на корисну модель № 29884 Богаєнко Е.М., Богаєнко М.В., Веремієнко А.В., Голенков Г.М., Попков В.С., Стенд для випробування лінійних електродвигунів. Україна. Оpubл. від 25. 01. 2008.
9. Шимони К. Теоретическая электротехника. Мир, 1964. 774 с.
10. Терлецкий Я.П., Рыбаков Ю.П., Электродинамика; Учебное пособие для студентов физико-специализированных университетов. 2-е изд. М.; Высшая школа, 1990.– 352с.
11. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч.2 – Машины переменного тока. Учебник для студентов высших техн. учеб. заведений. Изд. 3-е перераб. Л."Энергия", 1973. 648с.
12. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. Под редакцией О.Д. Гольдберга. – М. Высшая школа, 1984. 432 с.

Поступила 29.09.2009

Голенков Геннадий Михайлович, к.т.н., доцент,
Веремеєнко Андрей Владимирович
Киевский национальный университет строительства и архитектуры
Украина, 03037, Киев, пр. Воздухофлотский 31, КНУСА,
кафедра электротехники и электропривода
тел. (044) 241-55-65

Богаєнко Николай Владимирович
Попков Владимир Сергеевич
Научно-внедряющее предприятие
"Промэлектрооборудование"
Украина, 03179, Киев, ул. Ирпенская, 63а/125
тел. (044) 459-52-42

G.M. Golenkov, A.V. Veremeenko, M.V. Bogaenko, V.S. Popkov Magnetic induction distribution in the gap of a coaxial linear induction motor with a phase winding on the runner

The paper describes a test bench developed for linear motors and presents magnetic field characteristics measures in the gap of a coaxial linear induction motor with a phase winding on the runner. Numerical FEMM-based computation of magnetic induction the motor gap is made, good correlation with experimental results shown.

Key words – test bench, coaxial linear induction motor, magnetic induction distribution, FEMM-based computation

СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НЕЯВНОПОЛЮСНИМ СТАТОРОМ ДЛЯ ТЕПЛОВОЗІВ

Розглянутий стартер-генератор постійного струму з неявнополюсним статором для тепловозів, його конструктивні та електромагнітні особливості і відмінності в порівнянні з серійним стартер-генератором.

Рассмотрен стартер-генератор постоянного тока с неявнополюсным статором для тепловозов, его конструктивные и электромагнитные особенности и отличия в сравнении с серийным стартер-генератором.

В свій час були виготовлені і дослідженні декілька двигунів постійного струму різної потужності, в яких якір залишався без змін, а статор виконувався неявнополюсним (використовувалось статорне залізо асинхронних машин) з несиметрично розміщеною на половині полюсних ділень між поздовжньою і поперечною віссю обмоткою послідовного збудження, яка вмикалась так, щоб статорна обмотка разом із якірною обмоткою створювали основний магнітний потік. Незважаючи на те, що використовувались якорі серійних машин, що не є оптимальним рішенням, ці неявнополюсні двигуни показали вражаючі переваги перед своїми серійними аналогами [1, 2, 3].

В зв'язку з неможливістю збільшити потужність стартер-генератора 5ПСТГ для тепловозів з 62кВт до 70кВт в тих же габаритах, як того вимагає замовник, керівництво ВАТ "Електромашин", м. Харків, в 2008 р. прийняло рішення виготовити експериментальний стартер-генератор з неявнополюсним статором. На сьогодні такий стартер-генератор виготовлений і досліджується.

Для розуміння відмінностей експериментального стартер-генератора від серійного наведемо деякі дані серійного стартер-генератора.

Серійний стартер-генератор має довжину сталі якоря, основних і додаткових полюсів $l_{\delta} = 205$ мм, діаметр якоря $D_a = 294$ мм, діаметр корпусу 580 мм, зазор під основними полюсами $\delta = 2$ мм, під додатковими полюсами $\delta = (7+2)$ мм. Число полюсів і паралельних віток якоря $2p = 2a = 4$. На основних полюсах розміщена обмотка послідовного збудження для стартерного режиму вагою 12кГ і обмотка незалежного збудження – 45 кГ. Обмотка додаткових полюсів має вагу 37 кГ, всього на статорі 94 кГ міді. Число пазів якоря $Z_a = 46$, число колекторних пластин $k = 138$, секції одновиткові, число активних провідників $N_a = 276$.

При пусковому струмі, який повинен бути не більшим ніж $I_a = 2100$ А, стартер-генератор створює пусковий момент $M_n = 2000$ Нм.

Магнітний потік при цьому

$$\Phi = \frac{M \cdot \alpha \cdot 2\pi}{N_a p I_a} = \frac{2000 \cdot 2 \cdot 2\pi}{276 \cdot 2 \cdot 2100} = 2,167 \cdot 10^{-2} \text{ Вб},$$

Індукція в повітряному зазорі

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot p \cdot 10^4}{D_a \cdot l_{\delta}} = \frac{2,167 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^4}{29,4 \cdot 20,5} = 0,719 \text{ Тл}.$$

В експериментальному стартер-генераторі довжина заліза залишилась незмінною, діаметр якоря збільшився до 332,4мм, число пазів якоря $Z_a = 48$, число колекторних пластин $k = 144$, секції одновиткові, число активних провідників $N_a = 288$. Число полюсів і паралельних віток $2p = 2a = 6$, повітряний зазор $\delta = 1,3$ мм. Залізо статора – з асинхронного двигуна ВА05П280L4, внутрішній діаметр $D_i = 340$ мм, зовнішній діаметр $D_3 = 520$ мм.

На рис. 1 показана принципова електрична схема.

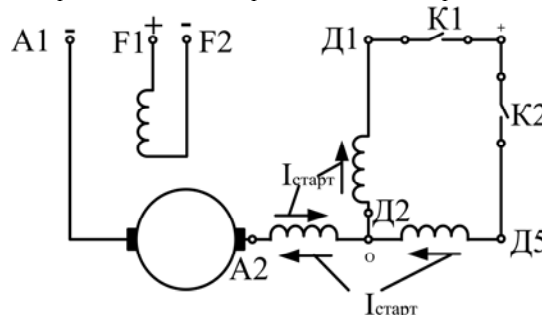


Рис. 1. Принципова електрична схема стартер-генератора

При замиканні контакту К2 стартер-генератор працює в стартерному (двигуновому) режимі. Струм протікає по обмотці статора Д5-0, яка має активних провідників $N'_{ст} = 30$ (двополюсна частина схеми показана на рис. 2), а також по обмотці статора 0-А2

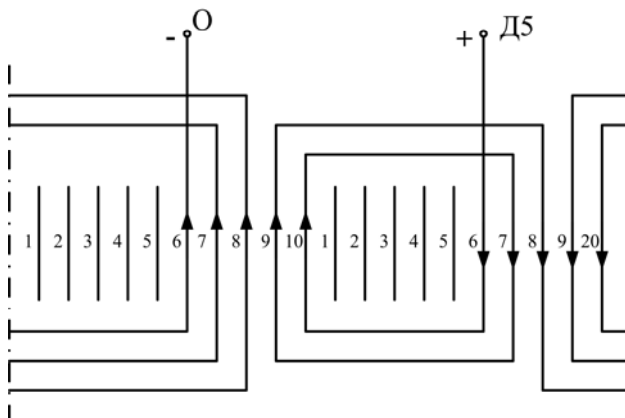


Рис. 2. Стартерна обмотка

(рис. 3, обмотка зображена жирними лініями, напрям струму в стартерному режимі показаний стрілками в нижній частині пазів). Обмотка 0-A2 має активних провідників $N_{ст}'' = 18$.

При розмиканні контакту К2 і замиканні К1 стартер-генератор переходить в генераторний режим роботи. Напрямок струму змінюється в якірній обмотці і в статорній обмотці 0-A2 (на рис. 3 напрям струму в генераторному режимі показаний стрілками у верхній частині пазів), а також протікає по статорній обмотці Д2-Д1 (рис. 3). Обмотка Д2-Д1 має активних провідників $N_{ст} = 30$.

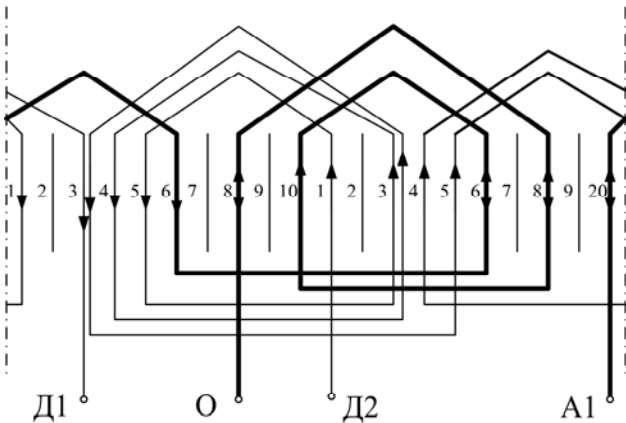


Рис. 3. Генераторна обмотка

Для підтримування незмінною напруги на якірних генераторних виводах А1-Д1 при зміні навантаження чи швидкості обертання якоря служить обмотка незалежного збудження F1-F2 (рис. 4), яка, щоб використовувати серійний реле-регулятор напруги, повинна мати такий же опір збудження $R_{зб.}$, як і в серійній машині.

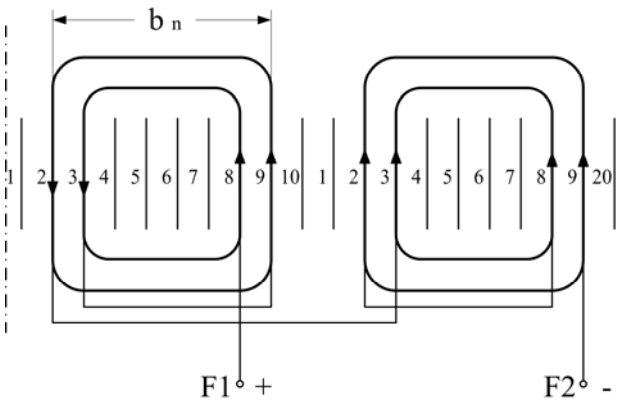


Рис. 4. Обмотка незалежного збудження

В стартерному режимі роботи основний магнітний потік, який направлений на поздовжній вісі d , створюється спільною дією МРС обмотки якоря і МРС стартерної статорної обмотки, яка складається із двох обмоток: обмотки Д2-0 та обмотки 0-A2.

Максимальне значення МРС якірної обмотки $F_{aq\max}$:

$$F_{aq\max} = A \cdot \frac{\tau}{2} = \frac{N_a \cdot I_a}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot 2} = \frac{N_a \cdot I_a}{2a \cdot 2p \cdot 2} \quad (1)$$

Обмотковий коефіцієнт якірної обмотки, оскільки вона рівномірно розподілена по всьому полюсному діленню, вираховується як відношення діаметра до половини довжини кола:

$$K_{об.а} = \frac{2 \cdot R}{\pi \cdot R} = 0,636 \quad (2)$$

Діюче значення МРС якірної обмотки:

$$F_{aq} = F_{aq\max} \cdot K_{об.а} = \frac{N_a \cdot I_a}{2a \cdot 2p \cdot 2} \cdot 0,636 = \frac{288 \cdot I_a}{6 \cdot 6 \cdot 2} \cdot 0,636 = 2,544 \cdot I_a \quad (3)$$

Максимальне значення МРС стартерної обмотки – $F_{ст.\max}$:

$$F_{ст.\max} = \frac{N_{ст} \cdot I_a}{2p \cdot 2} \quad (4)$$

Обмотковий коефіцієнт стартерної обмотки, яка займає тільки половину полюсного ділення, вираховується як відношення хорди чверті кола до четвертини довжини кола:

$$K_{об.ст} = \frac{2 \cdot R}{\sin 45^\circ \cdot \pi \cdot R} = 0,9 \quad (5)$$

Діюче значення МРС стартерної обмотки:

$$F_{ст} = F_{ст.\max} \cdot K_{об.ст} = \frac{N_{ст} \cdot I_a}{2p \cdot 2} \cdot K_{об.ст} = \frac{(N_{ст}'' + N_{ст}') \cdot I_a}{2p \cdot 2} \times \\ \times K_{об.ст} = \frac{(30 + 18) \cdot I_a}{6 \cdot 2} \cdot 0,9 = 3,6 \cdot I_a \quad (6)$$

Вектори МРС якірної F_{aq} і стартерної обмоток $F_{ст}$ утворюють між собою кут 135° . Сума цих векторів дає нам результуючу МРС поздовжньої дії (по вісі d) $F_{рез.} = F_d$, яка й утворює основний магнітний потік Φ_0 .

$$F_{рез.} = F_d = F_{aq} + F_{ст} \cdot \sin 45^\circ = 3,6 \cdot I_a \cdot 0,707 = 2,544 \cdot I_a \quad (7)$$

На рис. 5 на 20-и зубцях статора (подвійне полюсне ділення, $20 = \frac{Z_1}{p} = \frac{60}{3}$) показані напрями струму I_a стартерної обмотки і обмотки 0-A2 в стартерному режимі.

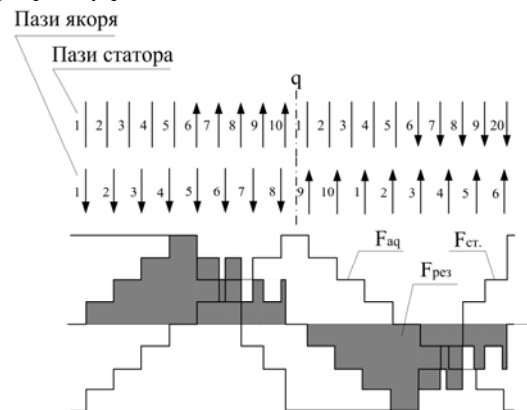


Рис. 5. Стартерний режим

Пази, в яких знаходяться 2 активних провідники, позначені жирними лініями. На 16-и зубцях якоря ($16 = \frac{Z_a}{p} = \frac{48}{3}$), які знаходяться під зубцями статора, указані напрями струму якірної обмотки. Так як в кожному пази якоря лежить $U_{\Pi}=6$ активних провідників, по яким протікає струм $i_a = \frac{I_a}{2a} = \frac{I_a}{6}$, то в кожному пази якоря маємо:

$$F_{n.a} = U_{\Pi} \cdot i_a = 6 \cdot \frac{I_a}{6} = I_a$$

На рис. 5 у відповідності з напрямками струмів і кількістю активних провідників в пазах побудовані МРС якірної обмотки F_{aq} , МРС стартерної обмотки $F_{ст}$ і результуюча МРС $F_{рез} = F_d$, яка є геометричною сумою магніторушійних сил F_{aq} і $F_{ст}$.

В мить пуску, при $n=0$, згідно з ТЗ, струм стартер-генератора не повинен перевищувати пусковий струм серійного стартер-генератора, тобто $I_a \leq 2100A$.

Використовуючи (7):

$$F_d = 2,544 \cdot 2100 = 5342A$$

Індукція в повітряному зазорі під час пуску:

$$B_{\delta} = \frac{F_d \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu} \cdot \delta_{MM}} = \frac{5342 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 1,7 \cdot 2,6 \cdot 1,3} = 1,162 \text{Тл},$$

де k_{δ} – коефіцієнт повітряного зазору, $k_{\delta}=1,7$;

k_{μ} – коефіцієнт, що враховує збільшення опору магнітопроводу, $k_{\mu}=2,6$.

Магнітний потік в мить пуску:

$$\Phi = B_{\delta} \cdot \frac{D_a \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-4}}{p} = 1,162 \cdot \frac{33,24 \cdot 20,5 \cdot 10^{-4}}{3} = 2,64 \cdot 10^{-2} \text{Вб}$$

Електромагнітний момент при пуску:

$$M = \frac{N}{a} \cdot \frac{p}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I_a = \frac{288}{3} \cdot \frac{3}{2\pi} \cdot 2,64 \cdot 10^{-2} \cdot 2100 = 2542 \text{Н} \cdot \text{м}$$

Експериментальні дослідження підтверджують ці дані, пусковий момент збільшився порівняно з серійною машиною на 27%.

В генераторному режимі роботи працюють статорні обмотки А2-0 і Д2-Д1 (рис. 1). Обмотка А2-0 виконує роль компенсаційної обмотки, обмотка Д2-Д1 працює частково теж як компенсаційна обмотка, а також і як генераторна обмотка, роль якої полягає у створенні основного магнітного потоку. Призначення компенсаційної обмотки – обмежити появу надмірного основного магнітного потоку і тим самим зменшити величину ЕРС обмотки якоря при високій частоті обертання якоря.

На кожному подвійному полюсному діленні обмоток А2-0 і Д2-Д1 є 12 активних провідників для компенсації якірної МРС – це симетрично розміщені провідники по всьому полюсному діленні в пазах 1-10, 3-8, 5-6, і на іншому полюсному діленні в пазах 11-20, 13-18, 15-16 (рис. 6). Провідники, що залишаються в пазах 3-4 і 13-14 (всього 4 провідників) створюють МРС $F_{ген.}$, яка по відношенню з некомпенсованою МРС якоря F_{aq}

знаходиться під кутом $\alpha=144^\circ$ (рис. 6).

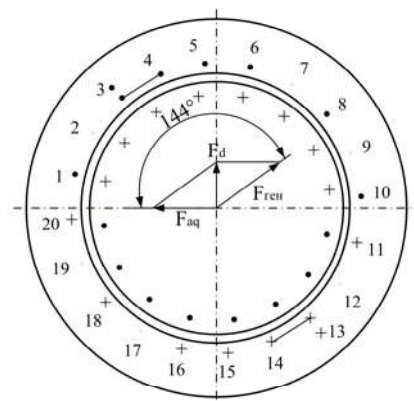


Рис. 6. Активні провідники в пазах статора і якоря

Тому, аналогічно (6):

$$F_{ген} = F_{ген\max} \cdot K_{об.ген.} = \frac{N_{ген.} \cdot I_a}{2p \cdot 2} \cdot K_{об.ген.} = \\ = \frac{4 \cdot p \cdot I_a}{2p \cdot 2} \cdot 0,9 = 0,9 \cdot I_a$$

При номінальному генераторному струмі якоря $I_a=682A$, аналогічно (7):

$$F_{рез} = F_d = F_{ген} \cdot \sin(180^\circ - 144^\circ) = 0,9 \cdot I_a \cdot 0,59 = \\ = 0,531 \cdot I_a = 337A$$

На рис. 7 на 20-и зубцях статора показані напрями струму I_a (пази, в яких знаходяться 2 активних провідники, позначені жирними лініями), який створює МРС F_{aq} , на 16-и зубцях якоря показані напрями струму якірної обмотки, який створює МРС F_{aq} , і показана результуюча МРС $F_{рез} = F_d$.

Індукція в повітряному зазорі:

$$B_{\delta} = \frac{F_d \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu} \cdot \delta_{MM}} = \frac{337 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 1,7 \cdot 1,1 \cdot 1,3} = 0,173 \text{Тл}$$

Тут $k_{\mu}=1,1$.

Магнітний потік:

$$\Phi = B_{\delta} \cdot \frac{D_a \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-4}}{p} = 0,173 \cdot \frac{33,24 \cdot 20,5 \cdot 10^{-4}}{3} = \\ = 0,388 \cdot 10^{-2} \text{Вб}$$

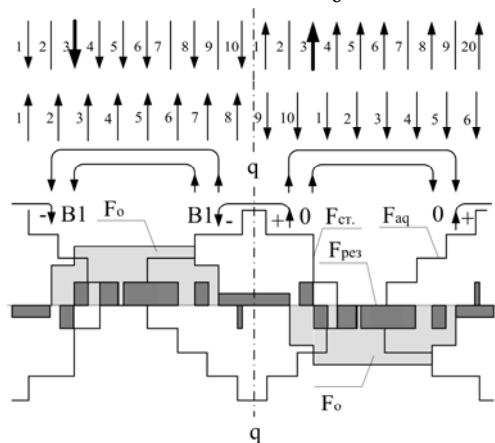


Рис. 7. Генераторний режим

ЕРС E_a в обмотці якоря при максимальній швидкості обертання стартер-генератора:

$$E_a = \frac{p \cdot n}{60} \cdot \frac{N}{a} \cdot \Phi = \frac{3 \cdot 3300}{60} \cdot \frac{288}{3} \cdot 0,388 \cdot 10^{-2} = 62,3 \text{ В.}$$

Підтримування напруги генератора ($U=110\text{В}$) незмінною при будь-якому навантаженні і при зміні швидкості від $n=1050$ об/хв. до 3300 об/хв. забезпечує обмотка незалежного збудження з допомогою реле-регулятора напруги.

Обмотка незалежного збудження (рис. 4) виконана із 2р концентричних котушкових груп, по дві котушки в групі. Великі котушки кроком $y_1=7$ мають число витків $w_{k1}=90$, малі котушки кроком $y_2=5$ виконані числом витків $w_{k2}=50$. Така обмотка має обмотковий коефіцієнт $k_{об}=0,9$ і створює МРС F_0 , показану на рис. 7. Навантаження на обмотку незалежного збудження значно менше в модернізованому стартер-генераторі порівняно з серійним завдяки меншому повітряному зазору, а також завдяки тому, що частина основного магнітного потоку створюється спільною дією МРС обмотки якоря і генераторної статорної обмотки.

В електричній схемі стартер-генератора передбачені одновиткові котушки обмотки додаткових полюсів 0-В1, які створюють МРС $F_{дод}$. (рис. 7), необхідна величина якої експериментально досліджується.

Загальна вага мідного проводу в статорі – 33 кг, тобто майже в три рази менша, ніж в серійній машині.

Потужність в експериментальній машині збільшується до 70 кВт за рахунок збільшення кількості комплектів щіток в півтора рази, а також завдяки зменшенню електричних втрат в обмотках. Так, для порівняння, втрати в обмотці якоря і додаткових полюсів в серійній машині при струмі $I_a = 564 \text{ А}$, $p_M = 4333 \text{ Вт}$, а в експериментальній втрати в обмотці якоря і обмотці А2-0 і Д2-Д1 $p_M = 3774 \text{ Вт}$, тобто на 13% менші.

В експериментальному стартер-генераторі відсутній негативний вплив реакції якоря, який в серійних машинах спотворює магнітний потік в повітряному зазорі і діє розмагнічуючим способом. Відпадає необхідність в додаткових полюсах. Величину повітряного зазору приймають мінімально можливою, виходячи з механічних умов надійності обертання якоря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лущик В.Д. Двигатели постоянного тока с неявнополюсным статором // Электротехника. – 1992. – № 8 – 9. – с. 14-17.
2. Лущик В.Д. Суміщені електричні машини та апарати. К.: Техніка, 1993.-203 с. Мова рос.
3. Лущик В.Д. Електричні машини постійного струму з новою системою електромагнітного збудження // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №2. – с. 39-41.

Поступила 20.08.2009

Лущик В'ячеслав Данилович, д. т. н., професор
Донбаський державний технічний університет,
кафедра "Електричні машини і апарати"
Україна, 94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16
тел. 80964387409, e-mail:info@dmmi.edu.ua

Варванський Артем Юрійович
ВАТ "Електромашина", СКБ
Україна, 61016, Харків, вул. Муранова, 106

V.D. Luschik, A.Yu. Varvansky

A diesel locomotive DC starter-generator with an implicit-pole stator

A diesel locomotive DC starter-generator with an implicit-pole stator is considered, its design and electromagnetic characteristics and distinctions compared with a production starter-generator.

Key words – diesel locomotive, DC starter-generator, implicit-pole stator, design and electromagnetic characteristics

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ВИРТУАЛЬНОГО СТЕНДА И ЕЕ ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Представлені математична модель двигуна постійного струму і алгоритм її реалізації стосовно віртуального дослідницького стенду цього двигуна. Подані схема і графічна модель стенду, а також робочі характеристики двигуна, отримані у віртуальній лабораторії, в якій він розташований.

Представлены математическая модель двигателя постоянного тока и алгоритм ее реализации применительно к виртуальному исследовательскому стенду этого двигателя. Показаны схема и графическая модель стенда, а также рабочие характеристики двигателя, полученные в виртуальной лаборатории, в которой он расположен.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных современных применений компьютерного моделирования в области электротехники является создание и использование для различных целей учебного и научно-исследовательского характера виртуальной электромашиной лаборатории (ВЭМЛ), концепция которой представлена в [1].

Среда виртуальной реальности (ВР) [2-3] позволяет пользователю погрузиться в искусственный мир и непосредственно действовать в нем с помощью специальных сенсорных устройств, которые связывают его движения с аудиовизуальными эффектами. Характерными признаками ВР являются: моделирование в реальном масштабе времени; имитация окружающей обстановки с высокой степенью реализма; возможность воздействовать на окружающую обстановку и иметь при этом обратную связь.

ВЭМЛ воспринимается пользователем как высокореалистичная пространственная многокомпонентная модель исследуемого объекта и сопутствующих элементов испытательного стенда, поведение которых управляется математической моделью. Состояние математической модели изменяется посредством интеракторных функций, которые определяют связи между действиями пользователя и состоянием графической модели.

Первыми объектами для ВЭМЛ избраны однофазный трансформатор, трехфазный асинхронный двигатель и двигатель постоянного тока (ДПТ) [4].

Целью данной работы является представление и апробация математической модели ДПТ с независимым возбуждением, работающего в составе виртуального лабораторного стенда. Эта модель должна достаточно реалистично обрабатывать изменение механической нагрузки на валу, так чтобы посредством "виртуальных" измерений можно было получать рабочие и регулировочные характеристики ДПТ при любом приемлемом наборе исходных параметров. К важным требованиям относятся также достаточно высокое быстродействие расчетного алгоритма, построенного на основе математической модели, так чтобы в процессе виртуальных экспериментов не происходило "торможение" динамической графической модели, отображающей ДПТ и окружающую среду ВЭМЛ.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СТЕНДА И КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Исходной базой для проектирования виртуального стенда с ДПТ и разработки соответствующей математической модели является принципиальная электрическая схема, которая представлена на рис. 1.

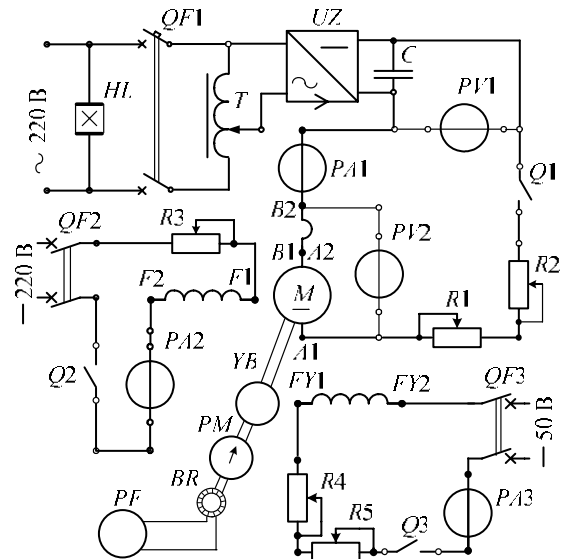


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема стенда ДПТ с независимым возбуждением

Напряжение питания на якорную цепь ДПТ (M) подается автоматическим выключателем $QF1$ через автотрансформатор T и выпрямитель UZ . Пульсации полученного напряжения U сглаживаются с помощью конденсатора C и оно измеряется вольтметром $PV1$ и подается на якорь через выключатель $Q1$. Напряжение U_a непосредственно на зажимах якоря измеряется вольтметром $PV2$, а ток I_a в якорной цепи – амперметром $PA1$. Управление двигателем через якорную цепь осуществляется пускорегулирующими реостатами $R1$ и $R2$, которые имеют суммарное сопротивление $R_{ad} = R_1 + R_2$,

Независимая обмотка возбуждения $F1-F2$ питается от источника постоянного напряжения U_E через автоматический выключатель $QF2$ и выключатель $Q2$.

Ток возбуждения I_E регулируется реостатом R_3 с сопротивлением R_3 и измеряется амперметром PA_2 .

Нагружается ДПТ электромагнитным тормозом YB . Нагрузка регулируется током I_Y обмотки возбуждения $FY1-FY2$, которая подключается к источнику постоянного напряжения U_Y автоматическим выключателем $QF3$ через выключатель $Q3$ и регулировочные реостаты R_4 и R_5 с суммарным сопротивлением $R_{Yd} = R_4 + R_5$, а сила тока контролируется по амперметру PA_3 . Момент вращения ДПТ M_l измеряется стрелочным указателем PM на электромагнитном тормозе. Частота вращения якоря ДПТ n определяется с помощью индикатора BR и счетного прибора PF . Величину n можно пересчитать в угловую скорость $\Omega = \frac{\pi n}{30}$, с которой удобнее оперировать в процессе расчетов состояния ДПТ.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДПТ

Представленные величины описывают состояние и процессы в исследовательской системе (рис.1) и являются в общем случае изменяющимися. Однако для "виртуальной материализации" этой системы необходимо задать целый ряд конкретных ее параметров и, прежде всего, параметров исследуемого ДПТ.

К основным относятся номинальные параметры ДПТ: P_N – мощность; U_N, I_{aN} – напряжение и ток якоря; n_N – частота вращения (об/мин); η_N – КПД, I_{EN} – ток возбуждения. Это можно дополнить номинальными угловой скоростью

$$\Omega_N = \frac{\pi n_N}{30} \quad (1)$$

и моментом вращения ДПТ

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} \quad (2)$$

Кроме номинальных параметров необходимы следующие величины: R_a – сопротивление обмоток якорной цепи (якоря $A1-A2$ и дополнительных полюсов $B1-B2$), dU_b – падение напряжения на один щеточный контакт, U_E – напряжение и R_E – сопротивление обмотки возбуждения ДПТ, U_Y – напряжение и R_Y – сопротивление обмотки возбуждения электромагнитного тормоза, $P_{mec\ nom}$ – механические потери мощности при номинальной частоте вращения; $P_{mag\ ad\ n}$ – сумма магнитных и добавочных потерь мощности при номинальных частоте вращения и токе возбуждения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДПТ В СОСТАВЕ ВИРТУАЛЬНОГО СТЕНДА

Для описания множества возможных состояний виртуального стенда необходим четкий алгоритм расчета всех величин в зависимости от устанавливаемых значений регулируемых параметров. Для построения такого алгоритма необходима математическая модель

ДПТ, которую построим на основе следующей системы уравнений, базирующихся на классических представлениях о ДПТ [5,6]:

баланс напряжений в якорной цепи

$$U = E_a + (R_a + R_{ad}) \cdot I_a + 2 \cdot dU_b; \quad (3)$$

ЭДС в обмотке якоря

$$E_a = c_E \cdot \Omega \cdot \Phi_a, \quad (4)$$

электромагнитный момент

$$M_{em} = c_E I_a \Phi_a, \quad (5)$$

где Φ_a – полезный магнитный поток в якоре.

Конструктивную постоянную ДПТ c_E определим, подставив (4) в (3) и используя номинальные значения величин $\Omega = \Omega_N$, $\Phi_a = \Phi_{a\ nom}$ и $I_a = I_{aN}$:

$$c_E = \frac{U_N - R_a I_{aN} - 2 \cdot dU_b}{\Omega_N \cdot \Phi_{a\ nom}}.$$

В установившемся состоянии в ДПТ имеет место баланс моментов

$$M_{em} = M_l + dM_l, \quad (6)$$

где выделена внутренняя потеря момента в ДПТ

$$dM_l = \frac{P_{mec} + P_{mag\ ad}}{\Omega}. \quad (7)$$

куда входят потери мощности, выражения для которых построены на основе проектных данных ДПТ [6]: сумма магнитных и добавочных потерь

$$P_{mag\ ad} = P_{mag\ ad\ n} \left(\frac{\Omega}{\Omega_N} \right)^{1,3} \cdot \left(\frac{\Phi_a}{\Phi_{o\ nom}} \right)^2 \quad (8)$$

и механические потери

$$P_{mec} = p_{1mec} \Omega + p_{2mec} \Omega^2, \quad (9)$$

где $p_{1mec} = 0,2992$ Вт/рад; $p_{2mec} = 0,002229$ Вт/рад².

Тормозной момент электромагнитного тормоза можно условно выразить зависимостью

$$M_l = k_{Ml} I_Y^2 \Omega, \quad (10)$$

где k_{Ml} – конструктивный коэффициент эффективности этого тормоза.

Ток в цепи якоря из (3) с подстановкой (4)

$$I_a = \frac{U - 2 \cdot dU_b - c_E \Omega \Phi_a}{R_a + R_{ad}}, \quad (11)$$

что позволяет на основе (5) получить формулу электромагнитного момента

$$M_{em} = c_E \Phi_a \frac{U - 2 \cdot dU_b - c_E \Omega \Phi_a}{R_a + R_{ad}}. \quad (12)$$

Тогда из уравнения (6) с учетом (10) имеем

$$c_E \Phi_a \frac{U - 2 \cdot dU_b - c_E \Omega \Phi_a}{R_a + R_{ad}} = k_{Ml} I_Y^2 \Omega + dM_l$$

и таким образом получается установившаяся угловая скорость вращения

$$\Omega = \frac{c_E \cdot \Phi_a \cdot (U - 2 \cdot dU_b) - dM_l \cdot (R_a + R_{ad})}{k_{Ml} \cdot I_Y^2 \cdot (R_a + R_{ad}) + c_E^2 \cdot \Phi_a^2}. \quad (13)$$

Очевидно, что для реалистичного взаимодействия величин, представленных в уравнениях, необходима функциональная зависимость магнитного потока Φ_a , учитывающая насыщение магнитопровода. В ее

основу положим зависимость магнитного потока от тока возбуждения $\Phi_o(I_E)$ в режиме холостого хода, которая задается реальной кривой намагничивания и представлена на рис.2, где обозначены точки Φ_{onom} – поток в режиме холостого хода при номинальном токе возбуждения I_{EN} ; I_{Es} и Φ_{os} – значения тока и потока в точке начала насыщения магнитопровода.

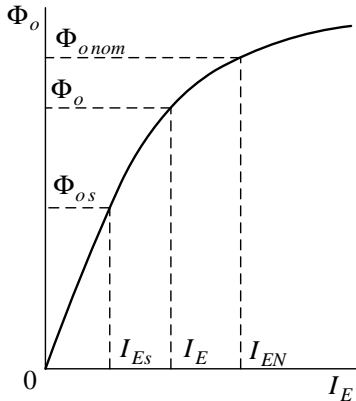


Рис. 2. Кривая намагничивания ДПТ в режиме холостого хода

Для расчетно-программного использования функции $\Phi_o(I_E)$ ее можно аппроксимировать аналитически полиномом вида

$$\Phi_o = \sum_{k=1}^K v_k I_E^k. \quad (14)$$

Для вычисления магнитного потока Φ_a в режиме нагрузки примем модель, основанную на семействе его зависимостей $\Phi_a(I_a, \Phi_o)$, частично проиллюстрированных на рис.3. Здесь исходное значение магнитного потока Φ_o при $I_a = 0$ для каждой из множества прямолинейных зависимостей $\Phi_a(I_a)$ определяется по рис.2 или на основе полинома (14).

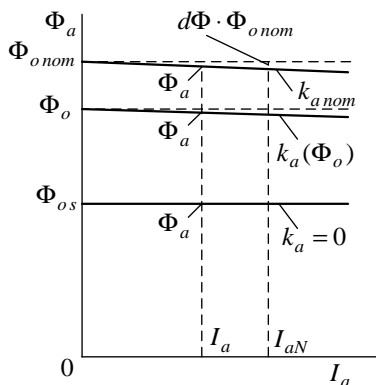


Рис. 3. Семейство зависимостей магнитного потока в режиме нагрузки ДПТ

С увеличением тока I_a поток Φ_a уменьшается ввиду известного действия реакции якоря [5], но при этом с уменьшением Φ_o уменьшается и наклон линий $\Phi_a(I_a)$, а при Φ_{os} реакцией якоря пренебрегаем, то есть линия $\Phi_a(I_a)$ становится параллельной оси абсцисс.

Фактически имеем сложную зависимость $\Phi_a[I_a, \Phi_o(I_E)]$, которую представим аналитически двумя ступенями линеаризации. Сначала используется локальная линейная зависимость

$$\Phi_a = \Phi_o - k_a \cdot I_a, \quad (15)$$

но сюда вводится изменяющийся линейно коэффициент учета реакции якоря

$$k_a = k_{anom} \frac{\Phi_o - k_{\Phi_s} \cdot \Phi_{onom}}{(1 - k_{\Phi_s}) \cdot \Phi_{onom}}, \quad (16)$$

где Φ_o – магнитный поток при текущем токе возбуждения и $I_a = 0$; $k_{\Phi_s} = \frac{\Phi_{os}}{\Phi_{onom}}$ – коэффициент уровня начала насыщения магнитопровода; $k_{anom} = d\Phi \frac{\Phi_{onom}}{I_{aN}}$ – значение коэффициента k_a при номинальном токе возбуждения, обеспечивающее заданное относительное изменение потока Φ_a от Φ_{onom} на $d\Phi$ при росте тока якоря от нуля (холостой ход) до номинального I_{aN} (при отсутствии стабилизирующей обмотки возбуждения можно принять $d\Phi = 0,05$ о.е., при ее наличии – $d\Phi = 0,02$ о.е.).

Магнитный поток Φ_{onom} в режиме холостого хода при номинальном токе возбуждения $I_E = I_{EN}$ определяется по полиному (14), номинальный магнитный поток Φ_{anom} – по (15) при $k_a = k_{anom}$, $\Phi_o = \Phi_{onom}$ и $I_a = I_{aN}$. Если $\Phi_o \leq \Phi_{os}$, то принимается $k_a = 0$.

РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

Номинальный ток возбуждения достигается при $R_3 = 0$, то есть

$$I_{EN} = \frac{U_E}{R_E}. \quad (17)$$

Верхний предел R_{3max} сопротивления реостата R_3 в цепи обмотки возбуждения выбираются из условия, что ток возбуждения регулируется от I_{EN} до $k_{IEmin} I_{EN}$, где k_{IEmin} – коэффициент допустимого снижения тока возбуждения (например, $k_{IEmin} = 0,4$). Тогда из соотношения на основании закона Ома $k_{IEmin} I_{EN} = \frac{U_E}{R_E + R_{3max}}$ с учетом (17) в итоге

$$R_{3max} = \frac{R_E \cdot (1 - k_{IEmin})}{k_{IEmin}}. \quad (18)$$

В цепи обмотки якоря верхний предел суммарного сопротивления реостатов R_{admax} определим по условиям пуска и регулирования частоты вращения.

Пусковой ток якоря из (11) при $\Omega = 0$ и при номинальном напряжении ограничим условием

$$I_{a1} = \frac{U_N - 2 \cdot dU_b}{R_a + R_{ad \max}} \leq k_{Ia1} \cdot I_{aN}, \quad (19)$$

где $k_{Ia1} = \frac{I_{a1}}{I_{aN}}$ – допустимая кратность пускового тока, например $k_{Ia1} = 2$.

После преобразований получаем из (19)

$$R_{ad \max} = \frac{U_N - 2 \cdot dU_b}{k_{Ia1} \cdot I_{aN}} - R_a. \quad (20)$$

Для реостатного регулирования зададим условие, что при $U = U_N$, $\Phi_a = \Phi_{anot}$ и $M_{em} = k_{Mnom} M_N$ возможно снижение Ω до нуля, где можно принять кратность момента на валу, например, $k_{Mnom} = 0,5$.

Тогда из формулы (11)

$$\Omega = \frac{U - 2 \cdot dU_b - (R_a + R_{ad}) \cdot I_a}{c_E \Phi_a} \quad (21)$$

и с подстановкой I_a из (5) и указанных величин

$$R_{ad \max} = \frac{(U_N - 2 \cdot dU_b) \cdot c_E \cdot \Phi_{anot}}{k_{Mnom} \cdot M_N} - R_a. \quad (22)$$

Из (20) и (21) надо выбрать большее значение и это сопротивление $R_{ad \max}$ распределить так, чтобы R_1 давало основную часть регулирования, а R_2 – более тонкую регулировку.

Напряжение U , подаваемое на якорную цепь ДПТ, должно регулироваться автотрансформатором T в пределах от нуля до $1,1 \cdot U_N$ с допустимым запасом.

Тормозной момент (10) может регулироваться изменением тока возбуждения I_Y посредством изменением сопротивления R_{Yd} реостатами грубой R_4 и точной R_5 регулировки. Наибольший ток I_Y при $R_{Yd} = 0$ примем как номинальный: $I_{YN} = \frac{U_Y}{R_Y}$.

Для определения приемлемого коэффициента эффективности тормоза k_{MI} зададим условие: при токе I_{YN} и минимальной угловой скорости вращения

$$\Omega = k_{\Omega \min} \Omega_N \quad (23)$$

обеспечивается момент сопротивления

$$M_l = k_{Mlm} M_N, \quad (24)$$

где $k_{\Omega \min}$, k_{Mlm} – коэффициенты минимальной кратности угловой скорости и максимальной кратности момента нагрузки (например, $k_{\Omega \min} = 0,1$ и $k_{Mlm} = 2$).

Тогда из (10) подстановкой (23) и (24) и $I_Y = I_{YN}$ получается искомым коэффициент

$$k_{MI} = \frac{k_{Mlm} M_N}{k_{\Omega \min} I_{YN}^2 \Omega_N}. \quad (25)$$

Наибольшее значение сопротивления R_{Yd} при минимальном токе $I_{Y \min} = \frac{U_Y}{R_Y + R_{Yd \max}}$ определим из условия, что при $\Omega = \Omega_N$ момент вращения можно довести до

$$M_l = k_{MI \min} M_N, \quad (26)$$

где $k_{MI \min}$ – коэффициент минимальной кратности момента нагрузки (например, $k_{MI \min} = 0,05$).

С учетом отмеченного, из (10) получается искомое сопротивление предельной регулировки

$$R_{Yd \max} = U_Y \sqrt{\frac{k_{MI} \Omega_N}{k_{MI \min} M_N}} - R_Y. \quad (27)$$

Естественно, что при разомкнутом ключе Q_3 (рис.1) I_Y и M_l должны быть нулевыми.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ДПТ С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Алгоритм на основе представленной математической модели ДПТ должен обрабатывать любое его состояние при выставленных значениях напряжения U , сопротивлений якорной цепи R_{ad} и цепи обмотки возбуждения R_3 и при изменяющемся моменте нагрузки M_l (10) – регулировкой тока возбуждения

$$I_Y = \frac{U_Y}{R_Y + R_4 + R_5} \quad (28)$$

электромагнитного тормоза сопротивлением R_{Yd} .

По сопротивлению реостата R_3 определяется ток возбуждения ДПТ $I_E = \frac{U_E}{R_E + R_3}$ и по (14) вычисляются соответствующий магнитный поток холостого хода Φ_o и коэффициент учета реакции якоря k_a (16).

Току I_Y (28) соответствует тормозной момент M_l (10), для которого должны установиться баланс моментов (6) и угловая скорость Ω (13). Найти эту величину можно при известных значениях магнитного потока Φ_a (15) и тока якоря I_a (11), а также надо знать dM_l (6), для чего в (8) и (9) необходимы также Φ_a и Ω . В такой ситуации задачу определения Ω по формуле (13) надо решать итерационным путем.

Для первого шага зададим приближенно $I_a = 0,5 \cdot I_{aN}$ и определим Φ_a по (15), Ω по (21), $P_{mag ad}$ (8), P_{mec} (9) и dM_l по (7). После этого можно начать основной итерационный цикл.

Определяем Ω по (13) (это будет Ω_k , где k – номер текущей итерации), а затем ток якоря I_a по (11), магнитный поток Φ_a (15) и dM_l по совокупности формул (7)–(9). Теперь можно вновь определить Ω (13) (это будет итерационное значение Ω_{k+1}).

Итерационный цикл можно контролировать по относительному изменению

$$d\Omega = \frac{abs(\Omega_{k+1} - \Omega_k)}{\Omega_N}. \quad (29)$$

Если заданная точность $d\Omega \leq d\Omega_{\max}$ не достигнута, то надо повторить итерационный цикл ($d\Omega_{\max}$ – допустимое относительное рассогласование, например, $d\Omega_{\max} = 0,001$). Опыт расчетов показал, что обычно достаточно 2–3 итераций.

Если условие $d\Omega \leq d\Omega_{\max}$ выполнилось, то можно переходить к досчету и выдаче следующих необходимых результатов:
частота вращения якоря

$$n = \Omega \frac{30}{\pi} = 9,549 \cdot \Omega; \quad (30)$$

ток якоря I_a по (11), магнитный поток Φ_a (16), dM_l по (7)-(9), E_a (4), M_{em} (5);

электромагнитная мощность

$$P_{em} = M_{em}\Omega = E_a I_a; \quad (31)$$

полезная – выходная мощность

$$P_{out} = P_{em} - P_o = P_{em} - P_{mec} - P_{mag ad}; \quad (32)$$

вращающий момент на валу

$$M_l = M_{em} - dM_l = \frac{P_{out}}{\Omega}; \quad (33)$$

потребляемая мощность ДПТ

$$P_{in} = U \cdot I_a + U_E \cdot I_E; \quad (34)$$

коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}; \quad (35)$$

напряжение непосредственно на зажимах якоря

$$U_a = U - R_{ad}I_a = E_a + R_a I_a + 2dU_b. \quad (36)$$

РАСЧЕТНЫЙ ВАРИАНТ ДПТ

Для практической реализации виртуального стенда и для тестовых расчетов за основу взят ДПТ, рассчитанный в [6] с параметрами (обозначения даны выше): $P_N = 7500$ Вт; $U_N = 220$ В; $n_N = 1500$ об/мин; $\eta_N = 0,866$; $I_{aN} = 37,7$ А; $R_a = 0,31$ Ом; $I_{EN} = 1,73$ А; $U_E = 220$ В; $R_E = 127$ Ом; $dU_b = 1$ В; $P_{mag ad n} = 127,4$ Вт; $P_{mecnom} = 102$ Вт; $\Omega_N = 157,1$ рад/с; $M_N = 47,75$ Н·м.

Заданы также упоминавшиеся выше значения относительных величин и коэффициентов: $d\Phi$, $k_{IE\min}$, $k_{\Phi s}$, k_{Ia1} , k_{Mnom} , $k_{\Omega\min}$, k_{Mlm} , $k_{Ml\min}$, $d\Omega_{\max}$, а также рассчитаны по уже известным формулам $c_E = 164,9$ рад⁻¹; $R_{3\max} = 191$ Ом; $R_{ad\max} = 12$ Ом; $R_{Yd\max} = 190$ Ом; $k_{an} = 1,112 \cdot 10^{-5}$ Вб/А; $k_{Ml} = 0,2432$ Н·м·с/А².

Кривая намагничивания была аппроксимирована двумя полиномами вида (14) и воспроизведена на рис.4. Их действие разграничено значением тока возбуждения $I_E = 1$ А. До этой точки имеет место полином при $K=5$ с коэффициентами $v_1=0,0064557$; $v_2=0,006353$; $v_3=-0,021614$; $v_4=0,024371$; $v_5=-0,009190$, за этой точкой – при $K=5$ с коэффициентами $v_1=0,105465$; $v_2=-0,549699$; $v_3=1,252823$; $v_4=-1,525404$; $v_5=1,077150$; $v_6=-0,444009$; $v_7=0,099399$; $v_8=-0,009355$. Тогда по (14) и (15) значения магнитного потока $\Phi_{onom} = 8,4$ мВб; $\Phi_{anom} = 8,0$ мВб; $\Phi_{os} = 3,4$ мВб.

В итоге на основе сформулированной математической модели и по представленному алгоритму был проведен целый ряд тестовых расчетов, которые подтвердили их работоспособность и эффективность. На рис. 5

показан один из примеров рабочих характеристик ДПТ, где представленные величины даны в безразмерной форме с очевидными их базовыми значениями.

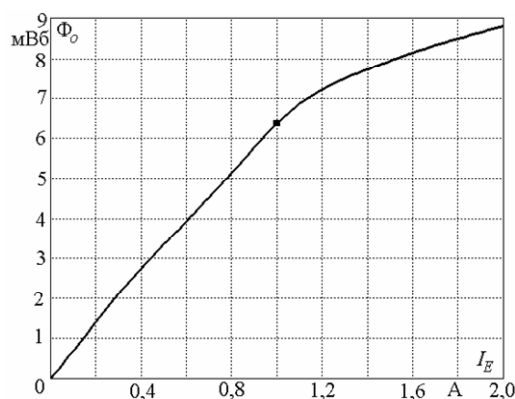


Рис.4. Магнитная характеристика ДПТ

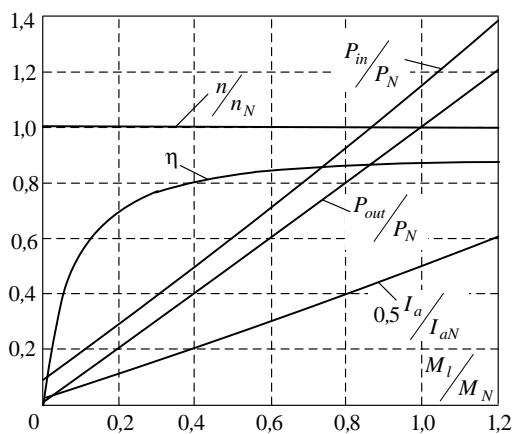


Рис.5. Рабочие характеристики ДПТ

ВИРТУАЛЬНЫЙ СТЕНД С ДПТ

Практической реализация виртуального стенда с ДПТ выполнена на основе принципиальной электрической схемы, представленной на рис.1. Виртуальный ДПТ в процессе сборки этого стенда показан на рис.6.

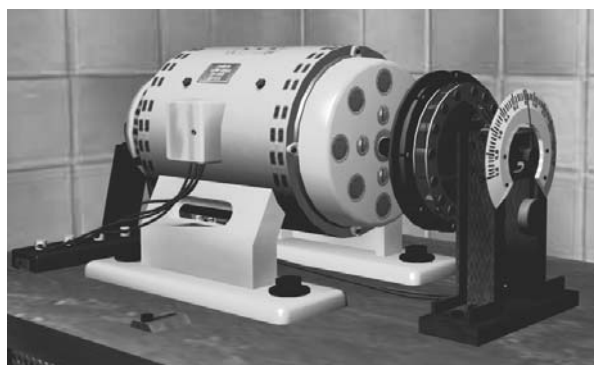


Рис. 6. Виртуальный ДПТ с электромагнитным тормозом

Общий вид готового стенда представлен на рис. 7 одним из фиксированных "снимков" лаборатории на экране компьютера. Здесь видны приборная панель, регулировочные реостаты и монитор, на экране которого дублируются в цифровой форме значения измеряемых величин. Таких фиксированных снимков можно сделать множество, как и в реальной лаборатории. Помещение ВЭМЛ, виртуальный стенд, исследуемое устройство ТАД и прочее оборудование

внешне представлены полноцветной динамической графической трёхмерной моделью, которая, с помощью специальных программных модулей (интеракторов) может быть полностью управляема [3,8].

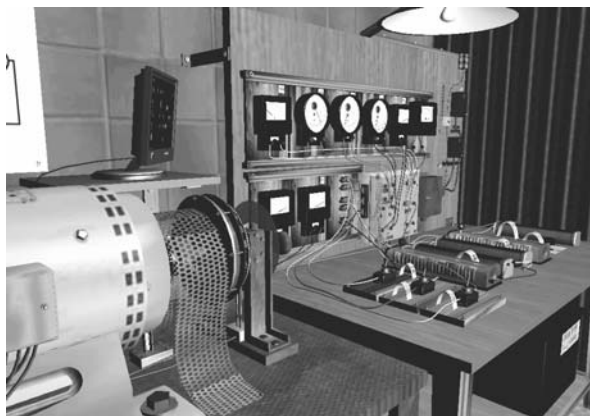


Рис. 7. Общий вид виртуального стенда с ДПТ

По ВЭМЛ можно перемещаться (в темпе движения человека) посредством зарезервированных клавиш на клавиатуре в совокупности с курсором на экране компьютера и "мыши". Можно подойти в любую точку помещения, к самим стендам и на воображаемом уровне досягаемости рукою включать и выключать аппаратуру, регулировать напряжение, изменять положения переключателей, ползунков реостатов и осуществлять прочие действия - вплоть до перемещения предметов. Так на рис.8 показан вид с открытыми оператором, работающим в ВЭМЛ, решетками, защищающими коллектор и блок питания ДПТ.



Рис. 8. Элементы стенда, открытые для их осмотра

Изменяя состояние графической модели на экране монитора, пользователь изменяет состояние системы математических моделей. Под этой системой следует понимать связанные через специальные проху-функции программные модули, которые отвечают за моделирование физических процессов (наблюдаемых и только регистрируемых), поведения объектов виртуального мира, откликов на действия пользователя (в том числе и такие, которые являются запрещенными или опасными при работе с реальными объектами). Так, например, при токовых перегрузках возникает искрение на коллекторе, а в критических ситуациях – даже "круговой огонь". При прикосновении к элементам, находящимся под напряжением, имитируются звуковые и зрительные эффекты, которые испытывает человек при токовом ударе.

Все моделируемые процессы в ВЭМЛ сопровождаются воспроизведением характерными для работы ДПТ звуками, по тональности которых можно оценить правильность его работы.

Предусмотрено все для полного объема "экспериментальных" исследований различных параметров и характеристик электротехнических устройств в разнообразных режимах. В том числе можно снять любые рабочие и регулировочные характеристики, в том числе и уже показанные на рис.5.

Встраиваются в ВЭМЛ и средства развлечения: при работе можно включить находящийся в ней плеер и прослушивать выбранные мелодии, можно полюбоваться рыбками, плавающими в аквариуме, видом за окном и т.д.

В итоге можно констатировать, что внедрение ВЭМЛ в учебный процесс и исследовательскую деятельность открывает перед ее пользователями новые – еще неизведанные перспективы. А сами разработанные математическая модель и алгоритм могут быть использованы не только в ВЭМЛ, но и для других целей исследовательского и учебного характера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милых В.И., Майстренко А.М. Концепция электромашиной виртуальной лаборатории и первые этапы ее воплощения // Электромашиностроение и электрооборудование.– Киев: "Техника", 2006.–Вип.66.–С.217-218.
2. Byrne C. Virtual Reality and Education. // University of Washington, Human Interface Technology Laboratory of the Washington Technology Center, Seattle, WA. Technical Publication 2002. –R-93-6.
3. Милых В.И., Майстренко А.М. Виртуальная реальность и принципы разработки виртуальной лаборатории трансформаторов и электрических машин.// Электротехника і електромеханіка.-2007.-№2.-С.74-81.
4. Міліх В.І., Майстренко О.М. Результати розробки базового комплексу віртуальної електромашинної лабораторії // Електроінформ.-Львів.-2007.-№4.-С.21-23.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.- 832 с.
6. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин. / Под ред. И.П.Копылова - М.: Энергия, 1980.- 496 с.

Поступила 17.08.2009

Милых Владимир Иванович, д.т.н., проф.,
Майстренко Алексей Михайлович
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",
кафедра "Электрические машины"
тел. (057) 707-65-14; e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua;
сайт: <http://users.kpi.kharkov.ua/kem/>

V.I. Milykh, A.M. Maistrenko

A direct current motor mathematical model for a research virtual bench and its practical realization

A direct current motor mathematical model and its realization algorithm for a research virtual bench are considered. A principal schematic and a graphical model of the research bench are given, performance characteristics of the motor placed in the virtual laboratory are obtained.

Key words – virtual reality, virtual reality hardware, electric machine, direct current motor, mathematical model, virtual laboratory, virtual reality toolkit

УРОВНИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ И КЛАССЫ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ В ТЕХНОЛОГИИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРЕДВИДЕНИЯ

Викладено результати досліджень, що відносяться до новітньої галузі теоретичних знань, що узагальнюються поняттям "генетичне передбачення". Розглядаються джерела і аналізується структура рівнів подання знань в технології генетичного передбачення. Наведено приклади реалізації технології генетичного передбачення в фундаментальних та прикладних задачах генетичної і структурної електромеханіки.

Изложены результаты исследований, относящихся к новой области теоретических знаний, обобщаемой понятием "генетическое предвидение". Рассматриваются источники и анализируется структура уровней представления знаний в технологии генетического предвидения. Приведены примеры реализации технологии генетического предвидения в фундаментальных и прикладных задачах генетической и структурной электромеханики.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема научного предвидения рассматривается современной наукой как самостоятельное направление системных исследований, результаты которых составляют основу разработки длительных прогнозов и принятия решений в области научной и инновационной политики на планетарном, региональном и государственном уровнях [1].

Современный словарь футурологии определяет предмет "предвидения научного" как вид теоретической деятельности, заключающийся в определении и описании на основе научных законов явлений природы и общества, которые не известны в данный момент времени, но могут возникнуть или быть изучены в будущем. Конечная цель предвидения – оптимальная стратегия управления (прогнозированием, планированием, проектированием, инновационным развитием и т.д.).

Проблема предвидения принадлежит к ключевым задачам научного знания и относится к числу важнейших функций науки. Важность этой проблемы очень образно охарактеризовал выдающийся ученый, лауреат Нобелевской премии в области химии за 1909 г. Вильгельм Оствальд: "Мертво всякое знание, которое ничего не говорит о будущем, и такому знанию должно быть отказано в почетном звании – наука".

Особого значения задачи предвидения приобретают в области техники, от уровня достижений которой все больше зависят жизненные потребности и благосостояние человека. Известные подходы к задачам предвидения и прогнозирования технических систем базируются на использовании вероятностных и эвристических приемов построения прогнозных сценариев, основанных на экстраполяции количественных ретроспективных данных на соответствующий временной интервал будущего. Это свидетельствует о том, что в настоящее время строгая теория научного предвидения отсутствует и, как следствие, универсальных и методологически совершенных подходов к разрешению указанной проблемы не существует.

Функционирование и разнообразие создаваемых человеком технических объектов, определяется их структурой. Поэтому для технических объектов и систем особого значения приобретают научно обоснованные технологии предвидения, способные обеспечить направленный синтез структурных вариантов систем (включающих как известные варианты, так и

потенциально возможные, т.е., еще отсутствующие на данное время эволюции), удовлетворяющих заданной функции цели. Наличие устойчивых методов решения задач структурного синтеза – ключ к инновациям, которые составляют основу стратегии инновационного развития отраслей техники и современных наукоемких технологий. Возможность получения такой системной информации в технических науках, в том числе, и в электромеханике, до последнего времени, считалась проблематичной.

Открытие периодической системы электромагнитных элементов (первичных источников электромагнитного поля), которая одновременно является их генетической классификацией (ГК) [2] и последующий анализ ее инвариантных свойств, потребовало пересмотра традиционных представлений о принципах структурной организации и законах развития сложных электромагнитных систем природного и природно-антропогенного типа. Впервые были установлены и научно обоснованы детерминированные логические взаимосвязи между периодической структурой ГК (периодами, группами, элементами), принципами сохранения электромагнитной симметрии и генетической информации (генетическим кодом) и законами развития структурного разнообразия электромагнитных и электромеханических объектов и систем.

Упорядоченная структура ГК, представляющая собой форму отображения принципов сохранения и интегрального периодического закона, по существу, выполняет функцию генетической программы, которая содержит всю генетическую информацию и определяет правила синтеза как известных, так и потенциально возможных структурных разновидностей ЭМПЭ. Наличие явно выраженной прогностической функции, которая проявляется на всех уровнях генетической организации электромагнитных систем, открыла возможность постановки принципиально новых классов задач, относящихся к проблематике генетического предвидения.

О ПРИРОДЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРЕДВИДЕНИЯ

Периодические системы целостных элементов физической или абстрактной природы, инвариантные свойства которых наделены явно выраженной наследственностью, автор обобщает понятием "порождающих систем", а задачи предвидения и познания новых

разновидностей объектов на их основе, рассматривает как новое научное направление исследований междисциплинарного характера [3]. Технология генетического предвидения и методология направленного генетического синтеза электромеханических структур формировалась параллельно с развитием теории генетической эволюции ЭМ-систем.

Предвидение, реализуемое на принципах генетической организации, имеет двойственную природу. С одной стороны, способность к предвидению заложена генетически в каждом человеке в форме врожденного инстинкта познания [4]. Как известно, система инстинктов человека, в которую входит и познавательный инстинкт, выполняет функцию сохранения существования индивидуума в условиях изменяющейся внешней среды. Ни один инстинкт не может осуществляться без познавательного инстинкта, функцией которого является обеспечение удовлетворения потребностей организма человека. Реализация этой, важнейшей функции, осуществляется через когнитивные механизмы мышления, качество и возможности которого в значительной степени определяются накопленным запасом знаний и уровнем сложности получаемой и обрабатываемой информации. Чем выше сложность информации, участвующей в процессе мышления, тем больше потребность головного мозга в осуществлении этого процесса. В условиях непрерывно увеличивающихся объемов информации, наибольшую ценность приобретает системная упорядоченная информация, которая в своей основе содержит сжатую (закодированную) информацию об ограниченном количестве исходных элементов и правил их преобразования. Таким образом, генетические принципы формируют не только генотип человека, но также оказывают определяющее влияние и на его поведение через фенотипические (приобретаемые) в процессе эволюции свойства (способ мышления, язык, систему образования, культуру и т.д.).

С другой стороны, исходный элементный базис, аксиоматику и разнообразие объектов предвидения, Природа закодировала в структуре уникальных высокоупорядоченных системных образований - порождающих систем, элементный базис которых наделен, кроме характерных для данного класса систем специфических свойств (химических, биологических, электромагнитных и т.д.), также генетической информацией.

Генетическая информация является наиболее фундаментальным типом информации, которая проявляется на всех уровнях структурной организации сложных развивающихся систем. Эта информация, которая в структуре ГК представлена универсальным генетическим кодом, непосредственно связана с эволюционирующим разнообразием систем-потомков, через категорию Вида, имеющего как генетическую, так и временную (эволюционную) природу. Устойчивость такой наследственной взаимосвязи определяется фундаментальным принципом сохранения генетической информации, который обеспечивает неизменность генетической структуры Вида и определяет возможные границы генотипической изменчивости структур – потомков в процессе их эволюции.

Главной знаниепорождающей фигурой в технологии генетического предвидения является человек, об-

ладающий развитым познавательным инстинктом и необходимым уровнем специальных и междисциплинарных знаний. Совместное использование эвристического потенциала двух генетически организованных систем (человека, с его развивающимся познавательным инстинктом и порождающей системы, с ее прогностической функцией) составляет основную идею технологии генетического предвидения.

Исходя из выдвинутой автором гипотезы множественности структур порождающих систем, можно дать следующее определение объекту данного исследования. Генетическое предвидение представляет собой новую междисциплинарную область научных знаний, связанную с открытием и познанием инвариантных свойств периодических порождающих систем и последующим определением на их аксиоматическом базисе потенциально возможных классов структур, которые не известны на данный момент времени, но генетически предопределены свойствами элементов исходной системы.

УРОВНИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ И КЛАССЫ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ

С точки зрения системологии, архитектуру данных в технологии генетического предвидения, можно представить последовательностью соответствующих эпистемологических уровней (уровнями знаний). Каждый уровень определяется собственным аксиоматическим и элементным базисом, которым ставятся в соответствие генетические модели и классы решаемых задач (табл.1).

Аксиоматика базового уровня (в терминах генетической теории, именуемого "генетическим") определяется структурными принципами и законами, формой представления которых выступает периодическая структура порождающей системы. Для электромеханических систем (ЭМ-систем) таким носителем является генетическая классификация (ГК) первичных источников электромагнитного поля. Классификация такого уровня одновременно выполняет роль системной модели по отношению к разнообразию потенциально возможных (генетически определенных) структурных классов ЭМПЭ.

Элементный базис на уровне ГК представлен упорядоченным множеством первичных источников электромагнитного поля (наборами родительских электромагнитных хромосом). Моделями структурного разнообразия ЭМПЭ выступают шесть топологически эквивалентных классов первичных источников поля, отображающих свойства элементного базиса подгрупп, и шесть геометрических классов порождающих элементов, определяющих структуру и свойства электромагнитных элементов в пределах малых периодов ГК

$$\langle H_{0.0y}, H_{0.0x}, H_{0.2y}, H_{2.0x}, H_{2.2y}, H_{2.2x} \rangle \subset S_0 \quad (1)$$

$$\langle G_{ЦЛ}, G_{КН}, G_{ПЛ}, G_{ТП}, G_{СФ}, G_{ТЦ} \rangle > M^1 \quad (2)$$

где $H_{0.0y}, H_{0.0x}, H_{0.2y}, \dots$ - подмножества элементов подгрупп; S_0 – множество порождающих элементов генетического уровня; $G_{ЦЛ}, G_{КН}, G_{ПЛ}, \dots$ - подмножества элементов малых периодов; M^1 – множество элементов первого большого периода.

Уровни представления знаний в технологии генетического предвидения

Уровень структурной организации	Аксиоматика уровня	Элементный базис	Модели
Генетический	Принцип целостности Принцип сохранения симметрии Принцип диссимметризации П. Кюри	Первичные источники электромагнитного поля (родительские электромагнитные хромосомы)	Генетическая классификация первичных источников электромагнитного поля (системная модель)
Хромосомный	Периодический закон Принцип сохранения генетической информации	Наборы парных электромагнитных хромосом (геном Видов)	Генетические модели структурообразования геномов
Популяционный	Генетические принципы структурообразования популяций	Генетически модифицированные хромосомы (геном популяции)	Генетические модели популяций
Видовой	Закон генетической целостности Вида	Структура популяций	Генетические модели видообразования
Системный	Закон гомологических рядов	Гомологические структуры	Топологические модели гомологических рядов
Межсистемный	Генетические принципы структурно-функциональной совместимости	Исходные структуры совмещаемых систем	Генетические модели синтеза совмещенных структур сложных систем
Метасистемный	Междисциплинарные аналогии и гомологии; Принцип самоподобия; Принцип периодичности	Элементы основания системы X_i -типа (порождающий период)	Концептуальная модель порождающей системы X_i -типа

Пересечением двух произвольных ортогональных подмножеств, определяются местоположение и генетическая информация конкретного порождающего элемента

$$e \in (G_i \cap H_j), \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}, \quad (3)$$

где n, m – количество элементов в группе и малом периоде, соответственно. Например,

$$(G_{ЦЛ}) \cap (H_{0.2y}) = e_{ЦЛ0.2y}, \quad (4)$$

где $ЦЛ0.2y$ – генетический код цилиндрического замкнутого, односвязного, диссимметричного источника электромагнитного поля, определяющего генотип Вида цилиндрических электрических машин вращательного движения. Структура универсального генетического кода (4) отображает инвариантную часть информации, определяемую принципом сохранения электромагнитной симметрии (инвариант группы и подгруппы) и принципом диссимметризации П. Кюри (инвариант малого периода).

Решение задач предвидения на элементном базисе периодической порождающей системы, неизбежно приводит к открытию специфических принципов сохранения и общесистемных законов структурной организации исследуемого класса систем. Применительно к структуре ГК, результатом таких исследований стало открытие принципа сохранения электромагнитной симметрии, принципа топологической инвариантности и интегрального периодического закона, отображающих наиболее общие свойства первичных электромагнитных структур. Именно на генетическом уровне были сначала предсказаны, а затем экспериментально подтверждены такие фундаментальные свойства первич-

ных электромагнитных структур как генетическое кодирование, изотопия, парность, первичная и вторичная периодичность, гомология. Обобщение результатов исследований на этом этапе завершилось созданием основ теории генетической эволюции ЭМ-систем [2].

Элементный базис хромосомного уровня представлен конечными наборами парных электромагнитных хромосом (электромеханических пар). Наборы парных хромосом представлены пространственно-топологическими моделями, определяющими геном функциональных классов и гомологических рядов ЭМПЭ. Количество порождающих структур в геноме каждого функционального или таксономического класса ЭМПЭ строго ограничено, что обеспечивает полноту поиска и направленность процедур синтеза таких структурных композиций. Аксиоматика хромосомного уровня определяется периодическим законом первичных источников поля и принципом сохранения генетической информации. Наличие таких закономерностей обеспечивает неизменность генетической информации и определяет пределы генотипической изменчивости электромагнитных структур-потомков в процессе их структурной эволюции.

Классы задач, относящиеся к хромосомному уровню принадлежат к принципиально новому научному направлению в генетической электромеханике, обобщаемому проблемой геномных исследований [5,6]. Геном – совокупность порождающих хромосом. Основная задача геномики – определение области существования, синтез и расшифровка порождающих хромосомных наборов, определяющих Видовое (макрогеномика) и популяционное (микрогеномика) разнообразие произвольных функциональных классов ЭМПЭ.

В общем случае, исходя из принципа топологиче-

ской инвариантности источника поля, область существования Q_F искомого класса объектов в многомерном пространстве значений базовых признаков ГК, определяется ограниченной совокупностью парных электромагнитных хромосом, удовлетворяющих заданной функции цели F_{II}

$$Q_F = \left[\begin{matrix} (s_{001}, s_{002}, \dots, s_{00k}) \\ (s_{021}, s_{022}, \dots, s_{02m}) \\ (s_{201}, s_{202}, \dots, s_{20n}) \\ (s_{221}, s_{222}, \dots, s_{22p}) \end{matrix} \right] \subset \langle S_0 \rangle \quad (5)$$

где, $s_{00i}, s_{02i}, s_{20i}, s_{22i}$ – порождающие наборы парных гомологических хромосом в пределах соответствующих групп; k, m, n, p – количество хромосом в соответствующем наборе. Таким образом, искомая область Q_F определяет не только структуру генома, но и содержит исчерпывающую информацию о количественном и генотипическом составе всех Видов (включая неявные) исследуемого функционального или таксономического класса ЭМПЭ.

Результаты геномных исследований позволяют увидеть не только удивительную упорядоченность в разнообразии электромагнитных и электромеханических объектов, созданных в процессе их технической эволюции, но и открыть новые структурные Виды, еще отсутствующие на данный момент эволюции [7]. Результаты макрогеномных исследований составляют системную основу для разработки геносистематики функциональных классов ЭМПЭ, а также создания информационных баз данных и баз знаний проектного и учебного характера [8].

Задачи предвидения и направленного синтеза новых структурных разновидностей ЭМПЭ по заданной функции цели относятся к популяционному и видовому уровням представления знаний.

Простейшую структурную модель ЭМПЭ можно представить парной хромосомой первого поколения гомогенного ($s_x \times s_x; s_y \times s_y$) или гетерогенного ($s_x \times s_y$) типа, образованных на основе соответствующих родительских хромосом s_x и s_y . Популяция некоторого Вода S_k есть множество $\{P_k\}$, $k = \overline{1, n}$ (где n – численность популяции). Каждая популяция имеет свою порождающую хромосому $s_{00} \in P_k$, образованную в результате применения соответствующего генетического оператора или последовательностей операторов, по отношению к родительской хромосоме

$$[f_g(s_j) \rightarrow s_{00} \rightarrow P_k] \subset S_j, \quad j = \overline{1, N}, \quad (6)$$

где s_i – родительская хромосома; f_g – генетический оператор; S_j – Вид ЭМПЭ; k – количество популяций в структуре S_j ; N – количество Видов исследуемого класса ЭМПЭ.

Аксиоматика этих важных для методологии поискового проектирования уровней, определяется пятью принципами генотипической изменчивости. Сравнительный анализ генетических механизмов структурообразования реальных Видов электромагнитной и биологической природы показал, что генетические принципы внутривидовой изменчивости обладают общностью как для электромагнит-

ных, так и биологических структур. Основу генетических алгоритмов внутривидового синтеза ЭМПЭ составляют генетические операторы скрещивания, инверсии, репликации, кроссинговера и мутации, комбинаторное пространство которых обеспечивает широкую амплитуду генотипического разнообразия объектов электромагнитного происхождения.

Модельный базис указанных уровней представлен соответствующими генетическими моделями (дивергентного или конвергентного типа), отображающих структуру популяций произвольных Видов ЭМПЭ на основе общесистемного принципа сохранения генетической информации (рис.1).

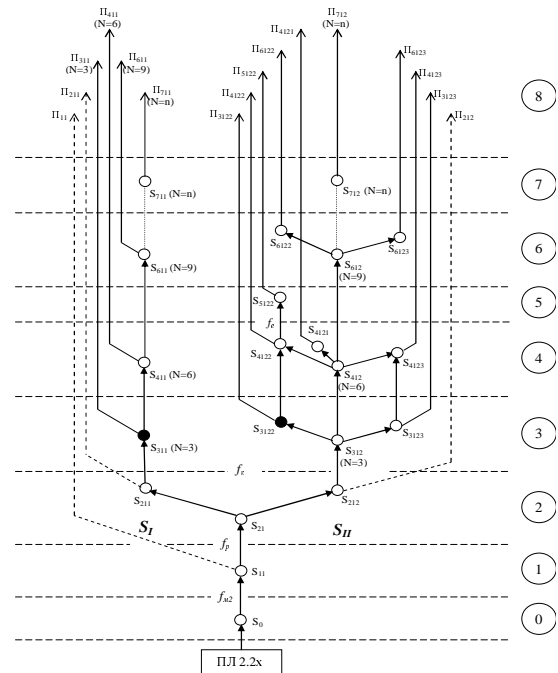


Рис. 1. Графическое представление дивергентной генетической модели (задача синтеза популяционной структуры плоских тяговых асинхронных двигателей (Вид ПЛ 2.2х) с групповой симметризацией фазных токов)

Методология направленного внутривидового синтеза генетически модифицированных структур, прошла успешную апробацию задачах инновационного проектирования различных функциональных классов ЭМПЭ [9]. Очередным успехом в решении задач данного уровня стало открытие пространственной и структурной электромагнитной изомерии, которая сначала была генетически предсказана, а впоследствии обнаружена на различных уровнях структурной организации функциональных классов ЭМПЭ [10].

Постановка и решение поисковых задач системного уровня базируется на технологии структурного предвидения, определяемой законом гомологических рядов ЭМ-систем. Гомологические ряды следует рассматривать как логическое следствие проявления принципа топологической инвариантности (групповое свойство источников поля генетического уровня) в структурной эволюции ЭМПЭ (системный уровень). Поэтому гомология в ЭМ-системах имеет генетически-эволюционную природу и проявляется на всех уровнях структурной организации и развития электромеханических объектов.

Результаты решения задач поиска представляются в

виде генетически родственных наборов структур, которые обобщаются понятием "идеального гомологического ряда", объединяющего структурных представителей реально-информационных и неявных (т.е., еще отсутствующих на данное время эволюции) топологически родственных Видов ЭМПЭ, удовлетворяющих заданной функции цели. Свойство структурной гомологии инвариантно к функциональному назначению систем, а также к времени эволюции. Поэтому реальные гомологические ряды ЭМПЭ обнаружить довольно сложно, так как гомологические объекты могут находиться на различных временных интервалах и относиться к различным функциональным классам ЭМ-систем.

Результаты синтеза гомологических рядов ЭМПЭ, в сочетании с внутривидовым синтезом генетически модифицированных структур и эвристическими методами их обработки, представляют собой высокоинтеллектуальную информацию, которая служит основой для создания генетических банков инноваций и разработки инновационных проектов.

Генетические банки инноваций – принципиально новый объект системно-инновационного типа, необходимость создания которых обусловлена результатами совместной реализации и развития трех новейших научных направлений генетической электромеханики: технологии генетического предвидения, геномных исследований и геносистематики. Такие систематизированные информационные системы предназначены для накопления, обработки и долговременного использования массивов генетической, графической и вербальной информации о генотипическом и структурном разнообразии функциональных классов электромагнитных и электромеханических систем. Вполне очевидно, что такие высокоинтеллектуальные системы нуждаются в правовой защите и должны быть отнесены к объектам национального достояния.

Задачи структурного синтеза объектов более высокого уровня сложности (гибридных, совмещенных систем, объединяющих структуру ЭМПЭ с системами и компонентами другой генетической природы (механическими, гидравлическими, электронными, биологическими и др.), относятся к межсистемному уровню представления знаний. Аксиоматический базис межсистемного уровня представлен принципами межсистемного синтеза с учетом генетической, энергетической, пространственной, функциональной и информационной совместимости исходных, генетически разнородных, структур. Этот уровень обеспечиваются моделями межвидового и межсистемного синтеза, структурное ядро которых определяется генетической информацией соответствующей родительской электромагнитной хромосомы и генетическими операторами скрещивания (совмещения). В результате решения инновационных задач данного уровня структурной сложности, впервые были определены принципы и границы существования гибридных и совмещенных ЭМПЭ, а также синтезированы их новые классы [11,12].

Результаты междисциплинарного анализа структур и инвариантных свойств порождающих систем периодического типа, открытых ранее (химия, биология (фрагменты)) и исследованных в последнее время (электромагнетизм, теория чисел) [2,3], дают основание утверждать, что функция генетического предвидения относится к общесистемным фундаментальным свойствам порождающих систем естественного и естественно-антропогенного происхождения. Наличие указанной закономерности позволяет выделить новый (верхний) уровень в иерархии представления знаний, который можно обозначить как метасистемный. Модельный базис этого уровня можно представить концептуальной моделью некоторой порождающей системы X_i – типа, которая является формой отображения общесистемных принципов (принципа самоподобия, принципа сохранения симметрии, принципа топологической инвариантности и интегрального периодического закона), инвариантных к физической природе элементов порождающей системы. Наличие такой модели с учетом анализа межсистемных аналогий и гомологий на уровне внутрисистемных принципов сохранения и законов развития, открывает возможность постановки задач предвидения и последующего открытия новых порождающих систем, относящихся к другим областям знаний.

Проблема предсказания и открытия порождающих систем X – типа, представляет принципиально новую, еще не исследованную область знаний междисциплинарного уровня. Ее анализ выходит за рамки данной статьи и составляет предмет самостоятельного научного исследования. Факт открытия порождающих систем – аналогов в дальнейшем, будет означать, что теория генетической эволюции сложных развивающихся систем естественного и естественно-антропогенного происхождения, может претендовать на роль синтезирующей теории научного предвидения.

ВЫВОДЫ

Рассмотренная иерархическая структура представления знаний отображает накопленный опыт постановки и решения задач генетического предвидения на различных уровнях организации сложных развивающихся систем. Аксиоматический базис технологии предвидения определяется совокупностью логически взаимосвязанных принципов сохранения, генетической информации и законов развития, формой представления которых выступают периодические порождающие системы. Структура знаний включает взаимосвязанную аксиоматику, упорядоченный элементный базис, модели и методы направленного структурного синтеза.

Представленные структурированные и упорядоченные знания можно рассматривать как научно-методологическую и информационную основу для постановки научных задач фундаментального характера (генетический и метасистемный уровни), а также решения широкого круга инновационных задач структурного предвидения (хромосомный, популяционный видовой, системный и межсистемный уровни) в прикладных исследованиях, в проектировании и в системе высшего технического образования.

Проблема организации и дальнейшего развертывания работ по технологии генетического предвидения и реали-

зации его результатов в соответствующих научных и инновационных проектах, связана, в первую очередь, с подготовкой высокопрофессиональных кадров, обладающих соответствующими уровнями знаний (от специальных инженерных к системным, междисциплинарным).

Феномен генетического предвидения, представленный нам самой Природой, неисчерпаем, как неисчерпаем процесс познания, а его возможности и последствия еще подлежат дальнейшему изучению и осмыслению.

Информацию о разнообразии систем окружающего нас мира Природа закодировала в виде уникальных системных образований – периодических порождающих систем, прерогатива открытия которых принадлежит исследователям, обладающих развитым познавательным инстинктом и высоким уровнем специальных и междисциплинарных знаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Технологическое предвидение. – К.: ИВЦ "Видавництво "Політехніка", 2005. – 156 с.
2. Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288с.
3. Шинкаренко В.Ф. Генетические периодические системы – новый объект междисциплинарных фундаментальных исследований. – Материалы междунар. науч.-техн. конф. "Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах". (24 – 28 сентября, 2007). – Севастополь, 2007. – С. 68 -74.
4. Григорьев А.В. Фрагменты осуществившейся эволюции. – К.: Оптима, 2003. – 131 с.
5. Шинкаренко В.Ф. На пути к расшифровке генома электромеханических преобразователей энергии. // Техн. електродинаміка. Темат. вип.: "Проблеми сучасної електротехніки". Ч.3. - 2004. – С. 40 – 47.
6. Shinkarenko V.F. Genomics and evolution of electromechanical energy converters. Proceedings of the 6th International conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems. 24-29 September, 2004. Alushta, Ukraine. – Vol. 1. - Alushta, 2004. – P. 147- 160.
7. Шинкаренко В.Ф. Актуальные проблемы и задачи генетической электромеханики. – Тр. III Междунар. науч.-тех. конф. "Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы "ЕЕССЕС-2007"". (Екатеринбург 27 – 29 сентября 2007 г.). – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2007. – С. 27 -33.

8. Шинкаренко В.Ф. Обертіві електричні машини: область існування, геноміка і таксономія класу // Електротехніка і електромеханіка, 2005, № 1. – С. 74 -78.

9. Шинкаренко В.Ф., Августинович А.А., Нестыкайло О.С. Генетическое моделирование внутривидовой структуры электромеханических преобразователей энергии // Електротехніка і електромеханіка, 2006. - № 4. – С. 42 – 46.

10. Шинкаренко В.Ф., Августинович А.А., Лысак В.В., Вахновецкая М.А. Структурная изомерия и ее моделирование в задачах генетического синтеза электромеханических структур // Електротехніка і електромеханіка, 2009 , № 1. – С. 33 - 36.

11. Шинкаренко В.Ф., Августинович А.А. Структура генома и макроэволюционный анализ совмещенных электромеханических систем типа "мотор – движитель" // Вісник Кременчуцького держ. політехн. універс. ім. М. Остроградського, 2007, вип. 3. Ч.2. – С. 22 -26.

12. Шинкаренко В.Ф., Криницький С.М. Структура геному суміщених електромеханічних систем типу "Електрична машина + інерційний накопичувач енергії"// Вісник Кременчуцького держ. політехн. універс. ім. М. Остроградського, 2007, вип. 3. Ч.1. – С. 8 -12.

Поступила 25.08.2009

Шинкаренко Василий Федорович, д.т.н., проф.
Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт",
Украина, 03056, Киев, пр.. Перемоги, 37, корп.20
тел.. (044) 241-76-38, e-mail: svf46@volicable.com

V.F. Shynkarenko

Levels of knowledge representation and classes of current tasks in a genetic foresight technology

This article presents results of research relating to a new theoretical knowledge field summarized by the notion of "Genetic Foresight". Sources and structure of knowledge representation levels in the genetic foresight technology are reviewed and analysed. The article presents examples of the genetic foresight technology implementation in fundamental and applied tasks of genetic and structural electromechanics.

Key words – genetic foresight technology, knowledge representation levels, fundamental and applied tasks, genetic and structural electromechanics

М.И. Баранов, М.А. Носенко

СРАВНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТОКА МОЛНИИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ОБШИВКУ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Проведено порівняльний аналіз результатів аналітичного і чисельного розрахунків перевищення температури в зоні прив'язки сильноточного іскрового каналу блискавки на плоскій поверхні металевій обшивці літального апарату (ЛА) при дії на неї тривалої складової струму блискавки. Показано гарна кореляція аналітичного та різницевого рішень для товстої стінки обшивці ЛА.

Проведен сравнительный анализ результатов аналитического и численного расчетов превышения температуры в зоне привязки сильноточного искрового канала молнии на плоской поверхности металлической обшивки летательного аппарата (ЛА) при воздействии на нее длительной составляющей тока молнии. Показана хорошая корреляция аналитического и разностного решений для толстой стенки обшивки ЛА.

ВВЕДЕНИЕ

Мировая практика эксплуатации гражданских и военных летательных аппаратов (ЛА) свидетельствует о том, что прямой удар молнии (ПУМ) в ЛА часто приводит к авариям с катастрофическими последствиями для авиационной и ракетно-космической техники [1, 2]. Среднестатистически каждый эксплуатируемый самолет один раз в год подвергается прямому воздействию мощного грозового разряда (молнии) [2]. При этом одними из основных поражающих ЛА факторов являются большие токи молнии амплитудой до сотен килоампер микросекундного временного диапазона и переносимые ею электрические заряды, обуславливающие при ПУМ в обшивку ЛА интенсивные электротепловые процессы, вызывающие при определенных условиях ее электротепловое разрушение.

Из известных работ, посвященных приближенным расчетам теплового действия сильноточного канала молнии на металлическую обшивку ЛА, следует указать [3-5]. Эти исследования содержат, в основном, одномерные математические модели температурного поля в зоне прямого электротеплового действия сильноточного канала молнии на плоскую стенку металлической обшивки ЛА, которые лишь в грубом приближении отражают сложные дву- и трехмерные нестационарные электротермические процессы, протекающие в указанной обшивке ЛА при ПУМ.

Целью данной статьи является сравнение разработанных нами аналитической и численной моделей для расчета нестационарных электротепловых процессов в локальной зоне действия ПУМ на металлическую стенку обшивки ЛА, математически моделирующих двумерное температурное поле в круговой области опорной зоны сильноточного канала искрового разряда молнии с длительной компонентой тока.

1. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБШИВКИ ЛА

Уточненная расчетная модель задачи. Рассмотрим в цилиндрической системе координат электротепловое воздействие сильноточного искрового канала 1 грозового разряда на размещенную в атмосферном воздухе металлическую стенку обшивки ЛА 2 толщиной b (рис. 1). Примем, что искровой канал молнии

представляет собой сплошной проводящий цилиндр радиусом r_0 , состоящий из низкотемпературной плазмы. Поверхность кругового контакта канала молнии с наружной поверхностью обшивки ЛА в первом приближении считаем близкой к плоской.

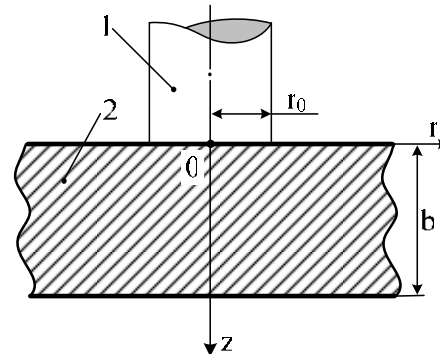


Рис. 1. Расчетная схема воздействия канала тока молнии на металлическую обшивку (1 – канал молнии; 2 – обшивка)

Неравномерностью распределения плотности тока молнии i_M по поперечному сечению канала молнии и соответственно радиальной неравномерностью плотности теплового потока в его круговой опорной зоне радиусом r_0 , поступающего для временного интервала $0 \leq t \leq t_0$ в металл обшивки ЛА, пренебрегаем. В соответствии с теорией нестационарной теплопроводности двумерное электротепловое уравнение для превышения (над температурой воздуха θ_0) температуры θ в металле плоского образца обшивки ЛА в безразмерном виде для длительной компоненты тока молнии при $i_M = \text{const} = I_m$ имеет вид [6, 7]:

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} = \frac{1}{r^*} \frac{\partial \theta^*}{\partial r^*} + \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial (r^*)^2} + \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial (z^*)^2} + \frac{I_m^2 c_0 \beta_0 (1 + \theta^*)}{\pi^2 r_0^2 \gamma_0 \lambda_0}, \quad (1)$$

где $\theta^* = \theta / \theta_b$, $\theta = \theta_t - \theta_0$; θ_t – текущая температура материала образца обшивки ЛА, °С; $\theta_b = (c_0 \cdot \beta_0)^{-1}$;

$r^* = \frac{r}{r_0}$, $z^* = \frac{z}{r_0}$, $t^* = \frac{t}{t_b}$, $t_b = \frac{c_0 \cdot r_0^2}{\lambda_0}$, r_0 – максимальный радиус канала тока молнии, м, λ_0 – коэффициент теплопроводности материала обшивки ЛА,

Дж/(м·с·°С); c_0 – удельная объемная теплоемкость материала обшивки ЛА, Дж/(м³·°С); β_0 – тепловой коэффициент удельной электропроводности материала обшивки ЛА, м³/Дж; γ_0 – удельная электропроводность материала обшивки ЛА, 1/(Ом·м); I_m – амплитуда длительной компоненты тока молнии, А; r, z – соответственно радиальная и продольная координаты в стенке образца металлической обшивки ЛА, м.

Уравнение (1) требуется дополнить необходимыми граничными и начальными условиями.

Начальное условие:

$$\theta^*(r^*, z^*, 0) = 0. \quad (2)$$

Граничные условия:

Для $r^* = 0$ и $0 \leq z^* \leq b/r_0$:

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial r^*} = 0; \quad (3)$$

Для $z^* = 0$ при $0 \leq r^* \leq 1$:

$$-\frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} = 10 \frac{I_m \cdot c_0 \cdot \beta_0}{\pi \cdot \lambda_0 \cdot r_0}; \quad (4)$$

При $r^* > 1$:

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} - Bi_0 \cdot \theta^* = 0, \quad (5)$$

где $Bi_0 = \alpha_0 \cdot r_0 / \lambda_0$ – наружный коэффициент Био [6], α_0 – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности ($z=0$) образца обшивки ЛА ($\alpha_0 = 5,6$ Вт/(м²·°С) для гладкой плоской металлической поверхности, контактирующей с окружающим воздухом [7, 8]).

Для $z^* = \frac{b}{r_0}$ и $r^* \geq 0$:

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} + Bi_b \cdot \theta^* = 0, \quad (6)$$

где $Bi_b = \alpha_b \cdot r_0 / \lambda_0$ – внутренний коэффициент Био [6], α_b – коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности ($z=h$) образца металлической обшивки ЛА ($\alpha_b = 5,6$ Вт/(м²·°С) [7, 8]).

Для удаленных расчетных радиальных областей образцов металлической обшивки ЛА, характерных при $r^* \geq 3$ (например, для $r^* = 3$ значение приращения температуры θ^* материала обшивки ЛА будет практически равно нулю), принимаем условие:

$$\theta^*(3, z^*, t^*) = 0. \quad (7)$$

Для уравнения (1) с граничными и начальными условиями (2)–(7) была построена разностная схема, обеспечивающая второй порядок аппроксимации по пространственному шагу h и временному шагу τ_c сетки [7]. При этом внутри рассматриваемой расчетной области металлической стенки образца обшивки ЛА получается $(N-1) \cdot (M-1)$ пересечений (узлов) сетки.

В разностном виде система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) будет иметь такой вид:

$$C_0 \theta_{i,j}^k + C_1 \theta_{i,j-1}^k + C_2 \theta_{i,j+1}^k + C_3 \theta_{i-1,j}^k + C_4 \theta_{i+1,j}^k = F_{i,j}^k, \quad (8)$$

где $C_0 = \frac{2 \cdot h^2}{\tau_c} + 4 - \frac{I_m^2 \cdot c_0 \cdot \beta_0}{\pi^2 \cdot r_0^2 \cdot \gamma_0 \cdot \lambda_0} \cdot h^2$; $C_1 = -1$;

$$C_2 = -1; C_3 = \frac{1}{2i} - 1; C_4 = -\frac{1}{2i} - 1;$$

$$F_{i,j}^k = \theta_{i,j}^{k-1} \left(\frac{2h^2}{\tau_c} - 4 + h^2 \cdot \frac{I_m^2 \cdot c_0 \cdot \beta_0}{\pi^2 \cdot r_0^2 \cdot \gamma_0 \cdot \lambda_0} \right) + \theta_{i,j-1}^{k-1} + \theta_{i,j+1}^{k-1} + \theta_{i-1,j}^{k-1} \left(1 - \frac{1}{2i} \right) + \theta_{i+1,j}^{k-1} \left(1 + \frac{1}{2i} \right) + \frac{2 \cdot I_m^2 \cdot c_0 \cdot \beta_0 \cdot h^2}{\pi^2 \cdot r_0^2 \cdot \gamma_0 \cdot \lambda_0}.$$

На рис. 2 представлен 5-точечный шаблон сетки, используемой при решении полученного выше разностного уравнения (8).

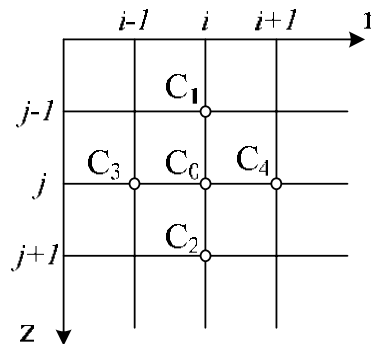


Рис. 2. Шаблон сетки для решения уравнения (8)

Начальные условия при решении уравнения (8)

для множества $\{ i = 0 \dots N; j = 0 \dots M \}$ примут вид:

$$\theta_{i,j}^0 = 0. \quad (9)$$

Граничные условия в разностной аппроксимации данной задачи будут иметь нижеследующий вид.

На границе $i=0$ (при $r^*=0$) действует граничное условие (3), которое представляется односторонней разностной аппроксимацией внутрь расчетной области. Тогда для данного условия можно получить следующее соотношение:

$$-3 \cdot \theta_{0,j}^k + 4 \cdot \theta_{1,j}^k - \theta_{2,j}^k = 0, \text{ для } \{ j = 0 \dots M-1 \}. \quad (10)$$

На границе $j=0$ (при $z^*=0$) имеем граничные условия для $0 \leq r^* \leq 1$ вида (4) и для $r^* > 1$ – вида (5).

Для производной на границе $j=0$ построена односторонняя внутрь расчетной области разностная аппроксимация второго порядка. После преобразования получим часть недостающих для нас уравнений.

Для области $0 \leq i \leq K$ имеем:

$$\theta_{i,0}^k = \frac{1}{3} \left(4 \cdot \theta_{i,1}^k - \theta_{i,2}^k + 10 \cdot \frac{I_m \cdot c_0 \cdot \beta_0}{\pi \cdot \lambda_0 \cdot r_0} \cdot 2h \right). \quad (11)$$

Для области $K < i \leq N-1$ находим:

$$\theta_{i,0}^k = \frac{4 \cdot \theta_{i,1}^k - \theta_{i,2}^k}{Bi_0 \cdot 2h + 3}. \quad (12)$$

На границе $j=M$ (при $z^*=b/r_0$) имеем граничное условие вида (6), которое аппроксимируется односторонней разностной аппроксимацией внутрь расчетной области. После преобразования недостающая часть уравнений запишется в виде:

$$\theta_{i,M}^k = \frac{4 \cdot \theta_{i,M-1}^k - \theta_{i,M-2}^k}{2h \cdot Bi_b + 3}. \quad (13)$$

Результаты расчета превышения температуры θ для плоского алюминиевого образца обшивки ЛА при воздействии на него длительной составляющей тока молнии ($I_m = 200$ А; $t_0 = 1$ с)

Толщина образца, мм	Температура на наружной поверхности образца, °С	Глубина проплавления, мм	Радиус лунки на наружной поверхности образца, мм	Радиус лунки на внутренней поверхности образца, мм
10	1528	1,25	1,80	–
4	1558	1,30	1,87	–
3	1618	1,50	1,93	–
2	1788	2,00	2,12	1,43

В результате численного решения сформулированной двумерной электротепловой задачи показано, что воздействие длительной или постоянной составляющей тока молнии с указанными амплитудно-временными параметрами (АВП) может приводить к значительному нагреву плоской стенки алюминиевой обшивки ЛА и ее сквозному проплавлению.

Упрощенная расчетная модель задачи. Рассмотрим далее вклад объемного источника тепла в стенке металлической обшивки ЛА, определяемого токовой составляющей амплитудой I_m в (1), на результаты расчета превышения температуры θ в стенке обшивки ЛА. С этой целью двумерное электротепловое уравнение для рассматриваемого плоского образца обшивки ЛА при $i_M = \text{const} = I_m$ запишем в следующем упрощенном и безразмерном виде [6, 7]:

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} = \left[\frac{1}{r^*} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial r^*} + \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial (r^*)^2} + \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial (z^*)^2} \right]. \quad (15)$$

Переменные величины, фигурирующие в (15) соответствуют параметрам, представленным в (1). При этом граничные и начальные условия сохраняются. Разностная схема задачи выглядит таким же образом, что и в предыдущем случае. В результате уравнение (15) в разностной форме будет иметь вид:

$$C_0 \theta_{i,j}^k + C_1 \theta_{i,j-1}^k + C_2 \theta_{i,j+1}^k + C_3 \theta_{i-1,j}^k + C_4 \theta_{i+1,j}^k = F_{i,j}^k, \quad (16)$$

где $C_0 = 2h^2/\tau_c + 4$; $C_1 = -1$; $C_2 = -1$; $C_3 = (2i)^{-1} - 1$;

$$C_4 = -\frac{1}{2i} - 1; F_{i,j}^k = \theta_{i,j}^{k-1} \left(\frac{2h^2}{\tau_c} - 4 \right) + \theta_{i,j-1}^{k-1} + \theta_{i,j+1}^{k-1} + \theta_{i-1,j}^{k-1} \cdot \left(1 - \frac{1}{2i} \right) + \theta_{i+1,j}^{k-1} \cdot \left(1 + \frac{1}{2i} \right).$$

Уравнения (16) и (9)–(14) представляют собой СЛАУ также порядка $(N-1) \cdot (M-1)$. Решив данную СЛАУ относительно $\theta_{i,j}^k$, получим распределение искомой функции $\theta_{i,j}$ на временном слое $k = t/\tau_c$, где t – текущее время.

Данная СЛАУ, также как и ранее полученная СЛАУ в разделе 1, имеет сильно разреженную матрицу. Поэтому она также решается с использованием метода Гаусса – Зейделя [9]. Для счета нами исполь-

На границе расчетной области $i=N$ (при $r^* = 3$) имеем граничное условие $\theta_{N,j}^k = 0$, характерное для бесконечно удаленной границы расчетной области. С учетом этого условия на линии $i = N-1$ получаем:

$$\theta_{N-1,j}^k = \frac{F_{N-1,j}^k - C_1 \theta_{N-1,j-1}^k - C_2 \theta_{N-1,j+1}^k + C_3 \theta_{N-2,j}^k}{C_0}. \quad (14)$$

Уравнения (8)–(14) представляют собой полученную нами СЛАУ порядка $(N-1) \cdot (M-1)$ для сформулированной электротепловой задачи. Решив данную СЛАУ относительно величины $\theta_{i,j}^k$, получим распределение искомой функции $\theta_{i,j}$ на временном слое $k = t/\tau_c$, где t – текущее значение времени.

Полученная СЛАУ имеет сильно разреженную матрицу, то есть матрицу с большим количеством нулей. Порядок данной СЛАУ может достигать нескольких тысяч. Как известно, при использовании прямых методов решения линейных систем будет происходить накопление погрешности из-за округления в ПЭВМ вычислений по младшему разряду чисел в разрядной сетке [9]. Поэтому для решения таких СЛАУ предпочтительны итерационные или блочно-итерационные методы. Решение системы разностных уравнений для обшивки ЛА проводилось с использованием итерационного метода Гаусса – Зейделя [9].

Численный расчет данной прикладной электрофизической задачи производился по алгоритму, приведенному в [7] для длительной составляющей тока молнии ($I_m = 200$ А; $t_0 = 1$ с) применительно к плоским алюминиевым образцам обшивки ЛА. Это дает возможность использовать нам следующие исходные количественные теплофизические характеристики для исследуемого металлического образца обшивки ЛА при численном решении с помощью полученной выше СЛАУ двумерного дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности вида (1) [5, 7]: $c_0 = 2,7 \cdot 10^6$ Дж/(м³·°С); $\beta_0 = 2,14 \cdot 10^{-9}$ м³/Дж; $\gamma_0 = 3,61 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м); $\lambda_0 = 240$ Дж/(м·с·°С).

Заметим, что радиус r_0 искрового канала грозового разряда при ПУМ в зоне его привязки на наружной поверхности алюминиевого образца обшивки ЛА применительно к длительной компоненте полного тока молнии определяется для данной расчетной модели температурного поля в металлической стенке с помощью известного эмпирического соотношения [3,5]: $r_0 = 0,11 \cdot 10^{-3} \cdot (I_m)^{1/2}$. Расчетные данные для превышения температуры θ в исследуемых образцах металлической обшивки ЛА, приведенные в табл. 1, позволяют при выполнении условия вида $\theta \geq \theta_n$, где $\theta_n = 660$ °С – температура плавления материала исследуемого алюминиевого образца обшивки ЛА [7], определить диаметр d_n и глубину b_n проплавленной конической лунки (с вершиной в сторону внутренней поверхности образца обшивки) в рассматриваемых листовых алюминиевых образцах обшивки ЛА.

зовались предыдущие численные значения АВП воздействующего на образец длительного тока и исходные количественные параметры для образца обшивки ЛА. Результаты этого численного расчета и их сравнение с данными, полученными для предыдущей уточненной разностной модели, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты численного расчета нагрева алюминиевых образцов обшивки ЛА при воздействии на них длительной составляющей тока молнии ($I_m=200$ и 400 А; $t_0=1$ с)

Толщина образца, мм	Температура на наружной поверхности образца, °С	Глубина проплавления образца, мм	Радиус лунки на наружной поверхности образца, мм	Радиус лунки на внутренней поверхности образца, мм
Без учета влияния токовой составляющей I_m				
$I_m = 200$ А				
10	1526	1,25	1,80	–
2	1787	2,00	2,12	1,43
$I_m = 400$ А				
10	2158	3,08	2,50	–
2	2984	2,00	4,30	4,20
С учетом влияния токовой составляющей I_m				
$I_m = 200$ А				
10	1528	1,25	1,80	–
2	1788	2,00	2,12	1,43
$I_m = 400$ А				
10	2163	3,08	2,50	–
2	2991	2,00	4,30	4,20

Из данных табл. 2 видно, что длительная токовая составляющая сильнотокового канала молнии, входящая в уравнение теплопроводности (1), дает незначительный вклад в температуру θ нагрева стенки алюминиевой обшивки ЛА практически вне зависимости от АВП этого тока, а размеры проплавленной лунки в стенке обшивки ЛА при этом совпадают. Поэтому можно заключить, что в уравнении (1) влиянием члена с постоянным током I_m на локальный нагрев металла обшивки ЛА при действии на нее длительной токовой компоненты молнии можно пренебрегать.

2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБШИВКИ ЛА

Аналитическое решение двумерной нестационарной электротепловой задачи для плоской металлической обшивки ЛА с длительной компонентой тока молнии производилось аналогично численному решению в разделе 1 также в цилиндрической системе координат согласно рис. 1. На основании известного из теории теплопроводности твердых тел фундаментального решения применительно к мгновенному точечному источнику тепла дисковой формы, воздействующему на плоскую наружную поверхность полубесконечного (массивного в электромагнитном и тепловом смысле) тела, для пространственно-временного изменения превышения температуры $\theta(r, z, t)$ материала рассматриваемой нами плоской стенки металлической обшивки ЛА конечной толщиной b в круговой зоне действия на нее во времени t поверхностного

теплового потока плотностью $q(t)$ от плазменного канала молнии было записано следующее приближенное аналитическое выражение [8, 10, 11]:

$$\theta(r, z, t) = \frac{r_0}{(\pi\lambda_0 c_0)^{1/2}} \int_0^{t_0} q(\tau) F(r, z, t - \tau) d\tau, \quad (17)$$

где $\theta(r, z, t) = \theta_t - \theta_0$; θ_t – текущая температура материала стенки обшивки ЛА; θ_0 – температура окружающего стенку обшивки ЛА воздуха, равная в нашем случае $\theta_0 = 20$ °С; r – радиальная координата, направленная от оси канала молнии вдоль стенки обшивки ЛА; z – продольная координата, направленная от очага теплового воздействия молнии внутрь стенки обшивки ЛА; $q(\tau)$ – плотность воздействующего на металлическую стенку обшивки ЛА теплового потока, вызванного плазменным каналом молнии (Вт/м^2);

$$F(r, z, t - \tau) = \exp[-z^2 c_0 / 4\lambda_0 (t - \tau)] \times$$

$$\times (t - \tau)^{-1/2} \int_0^\infty \exp[-\lambda_0 (t - \tau) v^2 / c_0] J_0(vr) J_1(vr_0) dv;$$

v, τ – вспомогательные переменные; t – текущее время; t_0 – длительность протекания постоянной (длительной) составляющей полного тока i_M молнии; J_0, J_1 – соответственно функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков.

Экспериментальные данные по имитационному воздействию длительной составляющей полного тока i_M молнии в воздушной двухэлектродной разрядной системе с алюминиевым образцом-анодом при практически неизменной во времени t ее амплитуде до $I_m = 400$ А и значении ее длительности до $t_0 = 1000$ мс свидетельствуют о том, что для этого случая электротермического нагружения алюминиевой обшивки ЛА можно использовать следующую уже упомянутую нами выше эмпирическую зависимость максимального радиуса r_0 канала сильнотокового искрового электрического разряда, перерастающего в электрическую дугу, от величины длительного тока в нем [3, 11]:

$$r_0 = 0,11 \cdot 10^{-3} (I_m)^{1/2}. \quad (18)$$

В результате для рассматриваемого случая, когда $q(t) = q_0$ (случай постоянной во времени t плотности теплового потока), для максимального превышения температуры $\theta(r, z, t)$ материала стенки металлической обшивки ЛА на стадии воздействия на нее длительной составляющей полного тока i_M молнии за время длительности t_0 ее протекания (как правило, $t_0 = 1$ с) в безразмерном виде получаем [12]:

$$\theta^*(r^*, z^*, t_0^*) = \left[\frac{10 I_m c_0 \beta_0}{\pi^{3/2} \lambda_0 r_0} \right] \cdot \int_0^{t_0^*} F(r^*, z^*, t_0^* - \tau^*) d\tau^*, \quad (19)$$

где $F(r^*, z^*, t_0^* - \tau^*) = \exp[-(z^*)^2 / 4(t_0^* - \tau^*)] \times$

$$\times (t_0^* - \tau^*)^{-0,5} \int_0^\infty \exp[-(t_0^* - \tau^*) v^{*2}] J_0(v^* r^*) J_1(v^*) dv^*;$$

$\theta^*(r^*, z^*, t_0^*) = \theta(r^*, z^*, t_0^*) / \theta_b$; $\theta_b = (c_0 \beta_0)^{-1}$ – ба-

зисная температура; $v^* = v \cdot r_0$; $r^* = r / r_0$; $z^* = z / r_0$;
 $t_0^* = t_0 / t_b$; $\tau^* = \tau / t_b$; $t_b = c_0 r_0^2 / \lambda_0$ – базисное время.

3. СРАВНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЙ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБШИВКИ ЛА

Сравнение результатов расчета нестационарного двумерного температурного поля в исследуемой обшивке ЛА по (19) согласно разделу 2, подробно описанного авторами в [12], с полученными здесь выше в разделе 1 расчетными данными для θ по разностной схеме решаемой задачи представлены ниже в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение результатов расчета температуры θ в алюминиевом образце обшивки ЛА на основе разностной и аналитической моделей для длительной компоненты тока молнии амплитудой I_m

Толщина образца, мм	Температура на наружной поверхности образца, °С	Глубина проплавления образца, мм	Радиус лунки на наружной поверхности образца, мм	Радиус лунки на внутренней поверхности образца, мм
Разностная модель				
$I_m = 200$ А				
10	1528	1,25	1,80	–
2	1788	2,00	2,12	1,43
$I_m = 400$ А				
10	2163	3,08	2,50	–
2	2991	2,00	4,30	4,20
Аналитическая модель				
$I_m = 200$ А				
10	1626	1,45	1,98	–
$I_m = 400$ А				
10	2253	2,87	3,45	–

Из данных табл. 3 видно, что аналитическая модель, в которой расчет производится для случая воздействия на толстую стенку ($b = 10$ мм) тока молнии, имеет хорошую корреляцию с результатами для θ , полученными при решении разностной модели для длительной компоненты тока молнии. Можно сделать вывод о том, что для образцов алюминиевой обшивки ЛА большой толщины (около 10 мм) использование аналитического решения (19) при определении двумерного температурного поля и размеров лунки их проплавления от действия длительного тока молнии является математически строго подтвержденным, технически и физически более предпочтительным путем. Кроме того, сравнение результатов полученного аналитического и численного решений двумерной нестационарной электротепловой задачи для металлической обшивки ЛА с тонкой стенкой (толщиной b в пределах от 1 до 10 мм), испытывающей воздействие длительной компоненты тока молнии, показывает, что аналитическое решение (19) может использоваться в соответствующих расчетах с погрешностью до 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Расчет кратера электротеплового разрушения на металлической обшивке летательного аппарата при прямом ударе в нее молнии // Электротехника і електромеханіка.– 2003.– №4.– С. 101–103.
2. Юман М.А. Естественная и искусственно инициированная молния и стандарты на молниезащиту // Труды американского ИИЭР.– 1988.– №12.– С. 5–26.
3. Абрамов Н.Р., Кужекин И.П., Ларионов В.П. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // Электричество.– 1986.– №11.– С. 22–27.
4. Абрамов Н.Р., Кужекин И.П. К расчету нагрева стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // Электричество.– 1990.– №5.– С. 56–59.
5. Баранов М.И. Одномерная электротепловая задача для металлической обшивки летательного аппарата при воздействии на нее молнии // Электротехніка і електромеханіка.– 2007.– №1.– С. 65–71.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности.– М.: Высшая школа, 1967.– 599 с.
7. Баранов М.И., Носенко М.А. Разностная схема двумерной электротепловой задачи для металлической обшивки летательного аппарата при прямом ударе в нее линейной молнии // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПІ".– 2008.– №44.– С. 9–18.
8. Карелю Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел.– М.: Наука, 1964.– 487 с.
9. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на Фортране.– М.: Мир, 1977.– 584 с.
10. Кучерявая И.Н. Тепловой анализ процесса электродинамической обработки гранул // Технічна електродинаміка.– 2003.– №2.– С. 67–71.
11. Баранов М.И., Носенко М.А. Двумерная электротепловая задача для металлической обшивки летательного аппарата при воздействии на нее молнии // Электротехніка і електромеханіка.– 2007.– №4.– С. 57–63.
12. Баранов М.И., Носенко М.А. Математическое моделирование электротепловых процессов в металлической обшивке летательного аппарата при воздействии на нее молнии // Технічна електродинаміка.– 2009.– №2.– С.13–22.

Поступила 30.06.2009

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.,
 Носенко Марина Александровна
 НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".
 Украина, 61013, г. Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ".
 тел. (057) 707-68-41, Факс (057) 707-61-33,
 e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov, M.A. Nosenko
Comparison of analytical and numeral solutions to a non-stationary electrothermal problem under action of a lightning current on an aircraft metallic skin
 A comparative analysis of analytical and numeral calculations of temperature rise is conducted in the lock-in zone of the high-current spark channel of a lightning on the flat surface of an aircraft metallic skin under action of a long component of the lightning current. A good correlation of the analytical and the numerical solutions is shown for the thick wall of the AC skin.
 Key words – lightning, current, aircraft, metallic skin, temperature, lock-in zone, spark channel

ДО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ МАЛОГАБАРИТНОГО ВВОДУ МОБІЛЬНОЇ ПОВІРОЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ

Розроблена методика визначення просторової траєкторії розвитку електричного стримера в малогабаритному високовольтному вводі мобільної повірочної лабораторії, яка враховує тривимірну конструкцію вводу.

Разработана методика определения пространственной траектории развития электрического стримера в малогабаритном высоковольтном вводе мобильной поверочной лаборатории, которая учитывает трехмерную конструкцию ввода.

ВСТУП

Одним з недоліків існуючих на даний час мобільних повірочних лабораторій (МПЛ), призначених для перевірки трансформаторів напруги (ТН) до 110 кВ включно, є їх конструкція, яка забезпечує працездатність МПЛ у так званому "розгорнутому" варіанті, при якому для роботи на місці перевірки необхідно вносити з автомобіля еталонне устаткування [1]. Тому роботи по забезпеченню експлуатації МПЛ без виносу еталонного устаткування є актуальним науковим завданням. Для забезпечення працездатності МПЛ у цьому варіанті вона повинна бути оснащена високовольтним малогабаритним вводом, що забезпечує введення високої напруги крізь кузов автомобіля, на шасі якого змонтовано МПЛ, до її високовольтного відсіку [1]. В даний час в країнах СНД комплект устаткування МПЛ для перевірки ТН до 110 кВ монтується переважним чином на шасі автомобіля ГАЗ-2705, або подібних автомобілів вантажопідйомністю порядку 1300 кг та довжиною порядку 5,5 м. Використання типових високовольтних ввідів (таких, як маслобар'єрні, паперово-масляні прохідні ізолятори з конденсаторними обкладками або маслonaповнені вводи вагою 380-470 кг та довжиною 2,6-3,1 м [2]) на робочу напругу 110 кВ для даного випадку є неприйнятним, оскільки їх розміри та вага стають порівнянними з автомобілем. В результаті виникає необхідність в розробці нового типу високовольтного електроустаткування - малогабаритного високовольтного вводу, який не має порцелянової покриття, і в якому в якості внутрішньої ізоляції використовується атмосферне повітря. Розрахунок електричної міцності такого вводу можливий з використанням стримерної теорії розряду та її розвитку.

Незважаючи на інтенсивні дослідження, проведені протягом століття, закінчена теорія електричного пробою газів до теперішнього часу відсутня. Існує значна кількість моделей, які інтерпретують різні стадії пробою найчастіше з діаметрально протилежних позицій.

Теоретичні уявлення про механізм стримерного пробою формувалися головним чином на основі класичних досліджень розрядних процесів [3-5]: лавинно-стримерної теорії Таунсенда (1900-1901 р.), теорій Леба, Міка, Ретера (1938-1940 р.), створених для опису розряду в коротких проміжках з однорідним полем.

Результати дослідження моделей плоскої хвилі іонізації показують, що її поширення можливе тільки в зовнішньому полі з напруженістю, що перевищує критичне значення $E_{кр}$, при якому швидкість іонізації молекул газу електронним ударом перевершує швидкість втрат електронів внаслідок прилипання і рекомбінації і яке для повітря при нормальних умовах становить близько 30 кВ/см [6]. У той же час експериментальні дані свідчать про те, що стример може досить стійко поширюватися в довгих проміжках при істотно менших середніх значеннях напруженості зовнішнього поля (близько 4-5 кВ/см) [6, 7]. Це має принципове

значення для оцінок електричної міцності, тому що, зароджуючись у сильному електричному полі, розряд може поширюватися у відносно слабкому зовнішньому полі "і навіть без нього" [6]. Знання умов виникнення електричного пробою повітря в сильно неоднорідному полі важливо для оцінки надійності ізоляції електротехнічного устаткування.

1. МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРИМЕРА ТА ЇХ НЕДОЛІКИ

Процес розвитку електричного пробою може бути описаний шляхом математичного моделювання його електрофізичних процесів на стримерній стадії.

Через велику трудомісткість розрахунків можливості двовимірного моделювання в даний час обмежені короткими проміжками (не більше 1-2 см). Тому більшість результатів, представлених в літературі, отримані у квазидвовимірній моделі стримерного розряду [6, 8, 9]. Незважаючи на спрощення квазидвовимірної моделі, до яких відноситься одновимірне поширення розрядної плазми і фіксований радіус каналу стримера, результати дослідження у вигляді одержуваних просторово-часових залежностей фізичних характеристик розряду таких, як концентрації заряджених часток, напруженість електричного поля, електричний струм, питома Джоулева потужність, з певною вірогідністю описують властивості реального фізичного об'єкта і дозволяють установити ступінь значимості того або іншого фактора, що впливає на динаміку стримера і швидкість поширення плазми електричного пробою.

У даний час динамічні властивості стримера досліджуються на основі різних варіацій квазидвовимірної моделі, запропонованої в [10]. Основні положення цієї моделі полягають у наступному:

- канал розряду розглядається як циліндр фіксованого радіуса r_c , що подовжується в процесі поширення;
- рух заряджених часток відбувається тільки уздовж осі каналу;
- радіальний розподіл щільності заряду уздовж перетину вважається заданим, не змінним в процесі розвитку;
- напруженість електричного поля, що діє на заряди, обчислюється на осі каналу.

Таким чином, дана модель описує динаміку "заряджених дисків" уздовж осі розряду.

Електричне поле, створюване зарядами, у такій постановці можна визначати як суперпозицію полів нескінченно тонких заряджених дисків (метод дисків) [6]. Сумарна напруженість електричного поля на осі системи складається зі складових напруженостей зовнішнього електричного поля, що мали б місце при відсутності зарядів, поля заряджених дисків і поля, створюваного відбиттями зарядів ρ на електродах.

Для квазидвовимірної моделі всі фізичні величини залежать від однієї просторової координати x , що

істотно спрощує рішення. Фіксований радіус каналу стримера r_c є параметром моделі.

Перевагою такої моделі є можливість розрахувати на її основі динамічні характеристики стримера при задовільній точності опису електричного поля в областях фронту і "гострого" електрода, що при двовимірних розрахунках електричного поля вимагає десятків годин машинного часу навіть на суперкомп'ютерах з продуктивністю в декілька десятків терафлопс [11].

Основним недоліком таких моделей є те, що всі вони не дають відповіді на питання: чи відбудеться перекриття складного міжелектродного проміжку при заданому значенні напруги, прикладеної до високовольтного електрода? Це питання є основним при проектуванні нового малогабаритного високовольтного устаткування. Тому, пропонується розробити просту, але в той же час тривимірну модель для визначення просторової траєкторії поширення стримера з наступним визначенням можливості перекриття проміжку уздовж цієї траєкторії.

Дане завдання може бути вирішене на сучасних персональних комп'ютерах за допомогою прикладного програмного забезпечення для розрахунку тривимірних електромагнітних полів, наприклад, пакета Femlab [12].

Метою даної статті є розробка інженерної методики визначення просторової траєкторії розповсюдження електричного стримера у малогабаритному високовольтному ввіді МПЛ, яка враховує його тривимірну конструкцію.

2. ТРИВИМІРНА МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ СТРИМЕРА

В усіх існуючих моделях стримера канал розряду розглядається як найпростіша геометрична фігура, наприклад, як циліндр фіксованого радіуса, що подовжується в процесі поширення у квазидвовимірній моделі стримера. Однак у середовищі Femlab важко представити скривлений у просторі стример навіть окремими циліндрами фіксованого радіуса. В цьому випадку немає необхідності моделювати весь процес "проростання" стримера в конструкції, а можна обмежитись розрахунком найбільш ймовірного шляху перекриття міжелектродного проміжку малогабаритного вводу МПЛ. В якості цього шляху може бути прийнята просторова траєкторія, яку залишає за собою скруглений циліндр фіксованої довжини l_0 і радіусу r_0 , що починає свій "рух", наприклад, з найбільш напруженої точки на заземленому електроді в напрямку високовольтного електрода. В даній моделі скруглений циліндр, що "рухається" з найбільш напруженої точки, власне, і представляє собою модель голівки стримера. Зазначимо, що моделі Даусона і Віна [13] голівка катодонаправленого стримера також представлялася сферою фіксованого радіуса.

В Femlab, як і в інших пакетах, заснованих на методі кінцевих елементів і, отже, призначених для замкнутих розрахункових областей, при розрахунку електричного поля у відкритих областях необхідно штучно обмежувати розрахункову область таким чином, щоб вона не впливала на значення електричного поля в розрахункових точках. З урахуванням цієї області, зовнішні розміри моделі по осях X, Y, Z можуть становити 1-2 м. У той же час стример моделюється циліндром довжиною l_0 та діаметром $2r_0$ з двома півсферами на кінцях радіусом r_0 (порядку 2,5 мм, що мінімально можливе для обраної моделі), із чого зрозуміло, що розмір сітки кінцевих елементів у моделі повинен бути менше радіуса сфери r_0 . Очевидно, що в

моделі зазначених розмірів сітка буде містити значну кількість вузлів, що зажадає дуже продуктивного комп'ютера. З іншої сторони було встановлено, що можливості Femlab не дозволяють зменшувати розрахункову сітку в складній тривимірній моделі, розміри різних елементів якої відрізняються на 3-4 порядки.

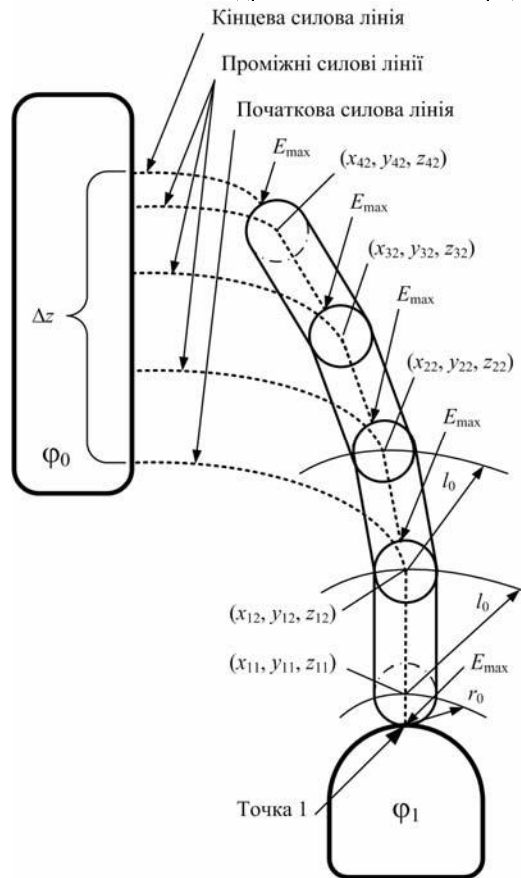


Рис. 1. До пояснення методу циліндра, "що рухається"

Розглянемо фрагмент моделі рис. 1, на якій представлений високовольтний електрод з малим радіусом кривизни, що знаходиться під високим потенціалом Φ_1 і електрод з великим радіусом кривизни, що знаходиться під нульовим потенціалом.

Стример розвивається із точки 1 з найбільшою напруженістю на високовольтному електроді. В середовищі Femlab визначення просторової траєкторії стримера за допомогою циліндра, що рухається, виконується у відповідності з наступним алгоритмом (рис. 1):

1) Проводимо виділену силовою лінією, що виходить із точки 1. Ця лінія є початковою лінією уздовж якої буде розвиватися розряд. На кожній наступній ітерації уточнюється положення цієї лінії.

2) Знаходимо координати початку 1-го циліндра. Для цього із точки 1 проводиться дуга радіусом r_0 до перетинання із виділеною силовою лінією, координати отриманої точки перетинання (x_{11}, y_{11}, z_{11}) і є координати початку 1-го циліндра. [При поясненні будемо притримуватися такої індексації координат точок: перша цифра індексу – це номер циліндра; друга цифра індексу – це позначення початку (1) або кінця (2) циліндра].

3) Знаходимо координати кінця 1-го циліндра. Для цього із точки (x_{11}, y_{11}, z_{11}) проводиться дуга радіусом l_0 до перетинання із виділеною силовою лінією, координати отриманої точки перетинання (x_{12}, y_{12}, z_{12}) і є координати кінця 1-го циліндра. Знайдені точки з координатами (x_{11}, y_{11}, z_{11}) і (x_{12}, y_{12}, z_{12}) – це

координати осі циліндра, і в них також розміщуються сфери радіуса r_0 для скруглення торців циліндра. Циліндру надається потенціал електрода, з якого починається розряд.

4) Розраховується картина поля отриманої геометричної моделі (малогабаритний ввід з циліндром в просторі).

5) На поверхні скругленого сферичного торця циліндра визначається точка з максимальною напруженістю.

6) Після локалізації точки з максимальною напруженістю з неї проводиться наступна виділена силова лінія.

7) Визначаємо координати 2-го циліндра. Координати початку 1-го циліндра – це в той же час і координати кінця 1-го циліндра, тобто $(x_{21}, y_{21}, z_{21}) = (x_{12}, y_{12}, z_{12})$. Знаходимо координати кінця 2-го циліндра. Для цього із точки (x_{21}, y_{21}, z_{21}) проводиться дуга радіусом l_0 до перетинання із виділеною силовою лінією, координати отриманої точки перетинання (x_{22}, y_{22}, z_{22}) і є координати кінця 2-го циліндра. Знайдені точки з координатами (x_{21}, y_{21}, z_{21}) і (x_{22}, y_{22}, z_{22}) – це координати осі циліндра, і в них також розміщуються сфери радіуса r_0 для скруглення торців циліндра. Циліндру так само надається потенціал електрода, з якого починається розряд.

8) В моделі знищується 1-й циліндр і залишається 2-й, таким чином моделюється рух голівки стримера. Розраховується картина поля отриманої геометричної моделі (малогабаритний ввід з циліндром в просторі).

9) Наведений алгоритм повторюється доти, поки черговий циліндр не досягне протилежного електрода. Ламана лінія, що проходить через точки (x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}) і (x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}) являє собою просторову траєкторію перекриття проміжку.

В такій моделі кінцева точка останньої силової лінії (траєкторія розвитку стримера) зсувається відносно кінцевої точки початкової силової лінії на певну величину Δz (рис. 1).

3. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Згідно з вищевказаною методикою був виконаний розрахунок електричного поля малогабаритного вводу МПЛ, загальний вид якого зображено на рис. 2. Ввід МПЛ складається з заземленого фланця, струмоведучого стрижня з діелектричною втулкою і несучих ізолюючих конструкцій (рис. 2). З метою зменшення розрахункової області і з врахуванням симетрії конструкції було змодельовано 1/3 реальної конструкції (рис. 3).

Розрахунок електричного поля дозволив локалізувати точку з максимальною напруженістю на фланці, з якої, відповідно починається розряд і провести з неї початкову силову лінію (рис. 4), вздовж якої і відбувається моделювання перекриття за наведеною вище методикою. Для наочності результуючі криві, отримані при моделюванні методом циліндра, "що рухається", зобразимо в радіальній площині ZOX (рис. 5). Крива 2 на рис. 4 зображена на рис. 5 під номером 4, а точка 1 на рис. 4 позначена на рис. 5 номером 3.

В літературі розглядаються дві моделі стримерного процесу, засновані на крайніх припущеннях: про "абсолютну" ізоляцію стримерної голівки і про ідеальну провідність стримерного каналу [14]. У реальності реалізується якийсь проміжний варіант і стример має проміжну провідність. У даній роботі були визначені ці обидві просторові траєкторії розвитку стримера за допомогою програми Femlab [12] для умов МПЛ-110. Перша траєкторія - це просторова траєкто-

рія стримера з малою провідністю, що співпадає із силовою лінією початкової картини поля довжиною 14,1 см (рис. 5, крива 4). Для розрахунку другої траєкторії рух голівки стримера моделювався методом циліндра, "що рухається". Це дозволило отримати криву 5 на рис. 5 довжиною 16,1 см.

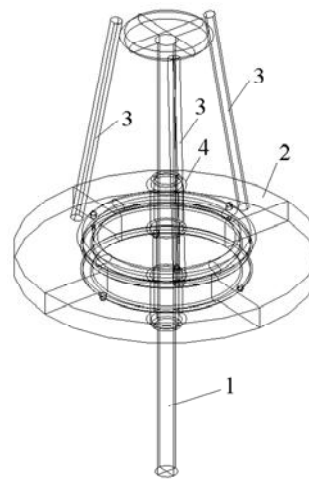


Рис. 2. Малогабаритний ввід МПЛ-110:
1 – струмоведучий стрижень;
2 – заземлений фланець;
3 – несучі ізолюючі конструкції; 4 – діелектрична втулка

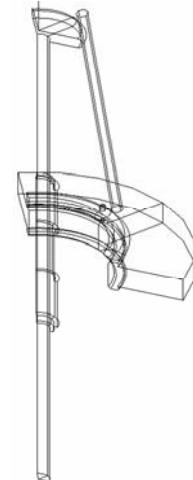


Рис. 3. Фрагмент розрахункової моделі вводу МПЛ-110

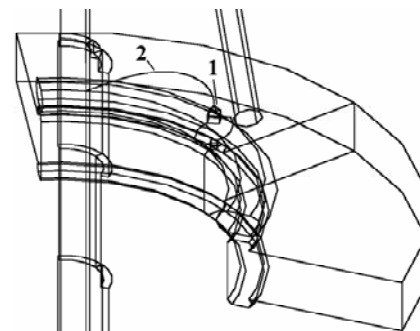


Рис. 4. Локалізація точки максимальної напруженості
1 – точка максимальної напруженості на фланці;
2 – початкова силова лінія проведена з точки максимальної напруженості

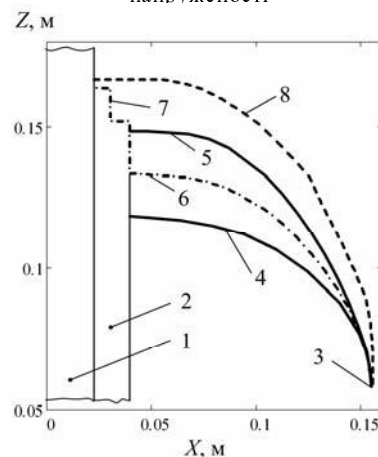


Рис. 5. Розрахунок траєкторій можливого перекриття вводу МПЛ-110:

1 – струмоведучий стрижень; 2 – діелектрична втулка; 3 – точка максимальної напруженості; 4 – початкова силова лінія; 5 – траєкторія перекриття з фланця на стрижень, визначена за механізмом розділу 2; 6 – середня лінія відносно кривих 4 і 5; 7 – шлях перекриття по поверхні втулки; 8 – траєкторія перекриття зі стрижня на фланець, визначена за механізмом розділу 2

Оскільки стример все-таки має деяку проміжну провідність, його реальна траєкторія перебуває між цими двома лініями. Його моделюємо еквідистантною кривою 6 довжиною 15,0 см. Загальний шлях розряду з фланця може бути виражений сумою ліній 6 і 7 на рис. 5., що становить 19,8 см.

2-й можливий варіант перекриття – розряд з верхні струмоведучого стрижня на заземлений фланець. Застосовуючи метод циліндра, "що рухається" було отримано криву 8 на рис. 5 довжиною 19,5 см. Серед розрахованих кривих необхідно вибрати найкоротшу, яку можна вважати за найбільш ймовірний шлях перекриття. Найкоротшою є крива 8, середня

напруженість вздовж якої дорівнює $E = \frac{90 \cdot \sqrt{2}}{19,5} = 6,5$

кВ/см, що суттєво перевищує критерій перекриття 4-5 кВ/см [6] і свідчить про можливість перекриття даного проміжку по даній траєкторії. Проведене експериментальне випробування показало, даний проміжок не витримує випробувальну напругу $U = 90 \cdot \sqrt{2} = 128$ кВ (ампл.) і перебивається при 112 кВ (ампл.), причому, по траєкторії кривої 8. Тому у ввіді МПЛ-110 [15, 16] з урахуванням проведеного дослідження було збільшено шлях ймовірного перекриття і використано додаткове профілювання втулки вводу, що унеможливило його перекриття при випробувальній напрузі.

ВИСНОВКИ

Для вирішення задачі з визначення витримуваної напруги розроблена методика визначення просторової траєкторії розповсюдження електричного стримера у малогабаритному високовольтному ввіді МПЛ, яка враховує його тривимірну конструкцію. В основу методики покладено визначення просторової траєкторії, яку залишає за собою скруглений циліндр, "що рухається" між найбільш напруженими точками досліджуваної конструкції. Методика дає відповідь на питання про можливість електричного перекриття електрично-го устаткування, що підтверджено експериментом.

Метою подальших досліджень слід вважати розробку другої стадії методики – визначення можливості перекриття малогабаритного високовольтного вводу по розрахованій траєкторії стримера.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бржезицький В.О., Троценко С.О., Куць А.А. Аспекти створення мобільних повітряних лабораторій для перевірки трансформаторів напруги і струму // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики". – Київ: "Політехніка", 2008. – 482 с. – С. 445-446.
2. Справочник электрика промышленных предприятий / Под общей редакцией А.А. Федорова и П.В. Кузнецова – М: Государственное энергетическое издательство, 1954. – 1040 с.
3. Лёб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. М.-Л.: Гостехтеоретиздат, 1950. – 672 с.
4. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
5. Петер Г. Электронные лавины и пробой в газах. М.: Мир, 1968. – 390 с.

6. Физические основы электрического пробоя газов / А.Ф. Дьяков, Ю.К. Бобров, А.В. Сорокин, Ю.В. Юргеленас; Под ред. А. Ф. Дьякова. – М: Издательство МЭИ, 1999. – 400 с.
7. Allen N.L., Ghaffar A. The conditions required for the propagation of a cathode-directed positive streamer in air // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. Vol. 28. №2. P. 331-337.
8. Пашинин И.В., Белогловский А.А., Матвеев Д.А., Гусев А.А., Белоусов С.В. Математическое моделирование электрического разряда в газах при анализе процессов в наносекундной импульсной стримерной короне // Электронный журнал "Новое в российской электроэнергетике". – 2006. – № 3. – С. 14-29.
9. Яковленко С.И. Механизм распространения стримера к аноду и к катоду, обусловленный размножением электронов фона // Электронный журнал "Исследовано в России". – 2004. – № 9. – С. 86-100.
10. Davies A.J., Evans C.J., Llewellyn-Jones F. Electrical breakdown in gases: the spatio-temporal growth of ionization in fields distorted by space charge // Proc. Roy. Soc. 1964. Vol. 281. P. 164-183.
11. Morrow R., Lowke J.J. Streamer propagation in air // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. Vol. 30. P. 614-627.
12. FEMLAB User's Guide and Introduction // FEMLAB 2.3. COMSOL. Inc. -1994-2002. - 436 p.
13. Dawson G. F., Winn W. P. A model for streamer propagation // Z. Phys. 1965. Bd.183. S.159-171.
14. Райзер Ю. П. Физика газового разряда: Учеб. руководство. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 592 с.
15. Бржезицький В.О., Бржезицький В.В., Ісаєв В.В., Кікало В.М., Лапченко А.М., Маслюченко І.М., Троценко С.О. Мобільна повітряна лабораторія класів напруги 0,22...110 кВ // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії: Матер. 6-ої наук.-практ. конф. / Уклад.: В.М. Кікало, С.В. Білоус. – К.: АБЕГА, 2007. – С. 202-204.
16. Бржезицький В.О., Бржезицький В.В., Волощенко В.В., Кікало В.М., Маслюченко І.М., Троценко С.О. Еталонні високовольтні трансформатори напруги тороїдального типу // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії: Матер. 6-ої наук.-практ. конф. / Уклад.: В.М. Кікало, С.В. Білоус. – К.: АБЕГА, 2007. – С. 96.

Поступила 30.08.2009

Бржезицький Володимир Олександрович, д. т. н., професор
тел.: (044) 241-76-35

Троценко Євгеній Олександрович,
Маслюченко Ігор Миколайович

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра техніки та електрофізики високих напруг,
тел.: (044) 454-92-37

Україна, 03056, Київ-56, проспект Перемоги, 37,

V.A. Brzhezitsky, E.A. Trotsenko, I.N. Masluchenko Calculation of electric strength of a small-size bushing of a mobile verification laboratory

A calculation procedure for a spatial trajectory of an electric streamer propagation in a small-size high-voltage bushing of a mobile verification laboratory is developed with allowance for 3D design of the bushing.

Key words – mobile verification laboratory, small-size bushing, calculation procedure

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИНДУКЦИОННОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ОДНОВИТКОВЫМ СОЛЕНОИДОМ, МАССИВНЫМ ЭКРАНОМ И ТОНКОСТЕННОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКОЙ

Стаття присвячена розрахункам основних характеристик індукційної індукторної системи з одновитковим соленоїдом, масивним екраном і тонкостінною листовою заготовкою. Отримана аналітична залежність для розрахунку щільності струму в металі екрану і листової заготовки в даній індукторній системі. Отримані аналітичні результати проілюстровані чисельними оцінками.

Статья посвящена расчётам основных характеристик индукционной индукторной системы с одновитковым соленоидом, массивным экраном и тонкостенной листовой заготовкой. Получены аналитические зависимости для расчёта плотности тока в металле экрана и листовой заготовки. Аналитические результаты проиллюстрированы численными оценками.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. В настоящее время все больше внимания уделяется вопросам магнитно-импульсных технологий. [1 – 3].

Последние по конечному результату действия весьма условно можно разделить на "традиционные" и "нетрадиционные". Их физическая сущность одинакова и сводится к силовому взаимодействию магнитного поля с проводящей средой. В традиционных технологиях используется отталкивание заданных участков обрабатываемой заготовки, а в новых нетрадиционных технологиях – притяжение. Появление в промышленности новых металлических сплавов также способствует возобновлению интереса к магнитно-импульсным технологиям.

Анализ основных достижений и публикаций.

Ярким примером нового использования энергии импульсных магнитных полей для обработки тонкостенных металлов является практическая реализация естественного эффекта притяжения листовой заготовки (не отталкивания!). Данный природный феномен был обнаружен впервые в НТУ "ХПИ" при деформировании стальных образцов импульсными магнитными полями с пониженными значениями рабочих частот. Как следовало из экспериментов, вариация частот приводила либо к известному эффекту отталкивания, либо к притяжению заготовки к рабочей поверхности одновиткового индуктора [3, 4].

Здесь следует упомянуть известные технические решения по магнитно-импульсному притяжению, основанные на суперпозиции "медленных" и "быстрых" полей. Наиболее практичными из них являются предложения инженеров Концерном "Boeing" и фирмы "Electroimpact", "Fluxtronic" [3].

Существенным недостатком этих решений является наличие двух источников мощности, достаточно сложных схем управления, систем высоковольтной электроники и т.д. Все эти факторы обуславливают высокую стоимость и низкую надёжность предлагаемых устройств, что существенно снижает их практическую значимость.

Особый интерес представляет предложение, так называемых, индукционных индукторных систем, принцип действия которых основан на силовом взаимодействии одинаково направленных токов. Их перспективность определяется достаточно широкими возможностями. Такие системы позволяют реализо-

вать притяжение не только магнитных, но и немагнитных металлов [1].

Притяжение заданных участков в комбинации с силами давления может дать новые решения по созданию гибких прогрессивных технологий будущего [2]. Что же касается собственно притяжения, то наиболее очевидным их применением может быть операция по удалению вмятин в металлических обшивках автомобильных кузовов и самолётов без каких-либо механических контактов с ними и повреждения их возможного внешнего лакокрасочного покрытия [3].

Цель работы – анализ электромагнитных процессов и расчёт плотности возбуждаемых вихревых токов в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом, массивным экраном и тонкостенной листовой заготовкой из металлов с одинаковой удельной электропроводностью – γ (рис. 1).

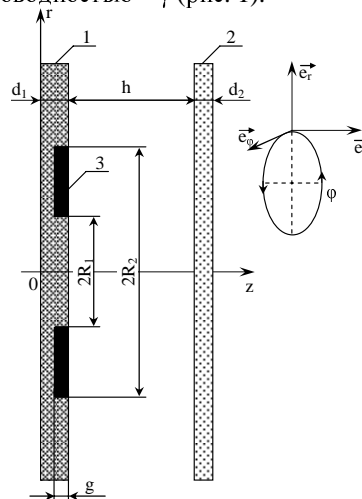


Рис. 1. Расчётная модель системы:

1 – вспомогательный экран, 2 – обрабатываемая листовая заготовка, 3 – одновитковый соленоид-индуктор
 \vec{e}_r , \vec{e}_φ , \vec{e}_z , – направляющие орты цилиндрической системы координат

ВИХРЕВЫЕ ТОКИ В МЕТАЛЛЕ ЭКРАНА И ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ

Для определения линейной плотности токов, индуцированных в металле вспомогательного экрана и листовой заготовки выпишем соответствующие выражения из работы [1]:

а) напряженность электрического поля в металле вспомогательного экрана

$$E_{\Phi}^{(2)}(p, \lambda, z) = C_1(p, \lambda) e^{q(p, \lambda)z} + C_2(p, \lambda) e^{-q(p, \lambda)z} + \frac{K(p, \lambda)}{q^2(p, \lambda)} \eta(z - (d_1 - g)) \operatorname{ch}(q(p, \lambda)(z - (d_1 - g))) - 1, \quad (1)$$

б) напряженность электрического поля в металле листовой заготовки

$$E_{\Phi}^{(4)}(p, \lambda, z) = A_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda) \cdot (z - (d_1 + h))} + A_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot (z - (d_1 + h))}, \quad (2)$$

где $q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p\mu_0\gamma}$.

Выражения (1) и (2) помножим на удельную электропроводность металлов и проинтегрируем их по переменной $z \in [0, d_1]$, $z \in [(d_1 + h), ((d_1 + h) + d_2)]$, соответственно.

Итак:

а) в металле вспомогательного экрана,

$$J_1(p, \lambda) \approx -\frac{4\tau_1 d_1 \cdot pj(p) f(\lambda)}{z^3} \left[\frac{F_1(\Theta, g)}{F_2(\Theta, d_1)} F_4(\Theta, d_1) - \left(\operatorname{sh}\left(\Theta \cdot \frac{g}{d_1}\right) - \left(\Theta \cdot \frac{g}{d_1}\right) \right) \right], \quad (3)$$

где $\tau_1 = \mu_0 \cdot \gamma \cdot d_1^2$ – характерное время диффузии поля в металл вспомогательного экрана,

$\Theta = q(p, \lambda) \cdot d_1$ – новая комплексная переменная, введенная для удобства дальнейших математических операций, необходимых для выполнения обратного преобразования Лапласа [6],

$$F_1(\Theta, g) = \operatorname{sh}\left(\frac{\Theta g}{2d_1}\right) \cdot \left[\operatorname{sh}\left(\frac{\Theta g}{2d_1}\right) + \frac{z}{(\lambda d_1)} \operatorname{ch}\left(\frac{\Theta g}{2d_1}\right) \right],$$

$$F_2(\Theta, d_1) = \left[1 + \left(\frac{\Theta}{\lambda d_1}\right)^2 \right] \cdot \operatorname{sh}(\Theta) + 2 \frac{\Theta}{\lambda d_1} \operatorname{ch}(\Theta),$$

$$F_4(\Theta, d_1) = \operatorname{sh}\left(\frac{\Theta}{2}\right) + \left[\operatorname{sh}\left(\frac{\Theta}{2}\right) + \frac{\Theta}{\lambda d_1} \operatorname{ch}\left(\frac{\Theta}{2}\right) \right];$$

б) в металле листовой заготовки,

$$J_2(p, \lambda) \approx -\frac{2\tau_2 \cdot pj(p) f(\lambda) (1 - e^{-\lambda d_2}) e^{-\lambda h}}{\lambda \cdot \Theta^2 \cdot \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2} \times \left[\frac{F_1(\Theta, g)}{F_2(\Theta, d_1)} F_3(\Theta, d_1) - \operatorname{sh}^2\left(\frac{\Theta g}{2d_1}\right) \right], \quad (4)$$

где $F_3(\Theta, d_1) = \left[\operatorname{sh}(\Theta) + \frac{\Theta}{\lambda d_1} \operatorname{ch}(\Theta) \right]$; $\tau_2 = \mu_0 \cdot \gamma \cdot d_1^2$.

Проанализируем полученные результаты.

Напомним, что выражения (3), (4) являются образами индуцированных токов в Фурье-Бесселевом и Лапласовом пространствах, найденными в предположении вспомогательного экрана произвольной "электродинамической" толщины ($\omega\tau_1$ – произвольно) и достаточно тонкостенной листовой заготовки ($\omega\tau_2 \ll 1$).

Если в рассматриваемой индукторной системе

как обрабатываемая заготовка, так и вспомогательный экран достаточно тонкостенны ($\omega\tau_{1,2} \ll 1$, $q(p, \lambda) \approx \lambda$), а толщина витка довольно мала ($g \rightarrow 0$), формулы для индуцированных токов существенно упрощаются.

Получаем, что

а) в металле вспомогательного экрана,

$$J_1(p, \lambda) \approx -\frac{\tau_1}{2d_1^2} \cdot \frac{f(\lambda) \cdot (1 - e^{-\lambda d_1})}{\lambda^2} \cdot p \cdot j(p), \quad (5)$$

где $j(p) = \left(\frac{I(p)}{R_2 - R_1} \right)$;

б) в металле листовой заготовки,

$$J_2(p, \lambda) \approx -\frac{\tau_2}{2d_2^2} \cdot \frac{f(\lambda) \cdot (1 - e^{-\lambda d_2}) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda^2} \cdot p \cdot j(p). \quad (6)$$

Выражения для индуцированных токов (5) и (6), не считая геометрических и электрофизических характеристик, отличаются друг от друга лишь множителем $e^{-\lambda h}$, определяющим зависимость в расположении экрана и заготовки относительно источника магнитного поля – витка индуктора. При "приближении" заготовки ($h \rightarrow 0$) зависимости (5) и (6) с физической точки зрения становятся совершенно идентичными.

Кроме того, (5) и (6) согласуются с соответствующими формулами для индуцированных токов, полученными ранее авторами работ [3].

Перечисленные обстоятельства свидетельствуют в пользу достоверности настоящих результатов.

Перейдём к вычислению оригиналов [5].

Начнём с выражения (3) и представим его в виде, удобном для выполнения обратного преобразования Лапласа.

$$J_1(p, \lambda) \approx -4\tau_1 d_1 \cdot pj(p) f(\lambda) \left[\frac{F_1(\Theta, g) \cdot F_4(\Theta, d_1)}{\Theta^3 \cdot F_2(\Theta, d_1)} - \frac{\left(\operatorname{sh}\left(\Theta \cdot \frac{g}{d_1}\right) - \left(\Theta \cdot \frac{g}{d_1}\right) \right)}{\Theta^3} \right], \quad (7)$$

Введенную комплексную переменную " Θ " представим как мнимую величину:

$$\Theta = q(p, \lambda) \cdot d_1 = i \cdot \beta_k. \quad (8)$$

Подставим (8) в знаменатели выражения (7) и приравняем их к нулю.

Для первого алгебраического слагаемого $\Theta = 0$ – устранимые особые точки. А равенство $F_2(i \cdot \beta_k, d_1) = 0$ даёт уравнение для величин β_k .

$$\frac{1}{2} \left(\left(\frac{\beta_k}{\lambda d_1} \right)^2 - 1 \right) \cdot \sin(\beta_k) = \left(\frac{\beta_k}{\lambda d_1} \right) \cdot \cos(\beta_k). \quad (9)$$

Для второго алгебраического слагаемого – $\left(\operatorname{sh}\left(\Theta \cdot \frac{g}{d_1}\right) - \left(\Theta \cdot \frac{g}{d_1}\right) \right) / \Theta^3$ имеют место только устранимые особые точки $\Theta = 0$. Вычеты в них равны нулю, и оригинал данного слагаемого также равен нулю.

Как следует из (9) и представления (8), особыми точками функции комплексного переменного

$\frac{F_1(\Theta, g) \cdot F_4(\Theta, d_1)}{\Theta^3 \cdot F_2(\Theta, d_1)}$ являются простые отличные от нуля полюсы $-p_k$:

$$p_k = -\frac{1}{\tau_1} \cdot (\beta_k^2 + (\lambda d_1)^2), \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

Далее, в соответствии с теоремой об оригинале дробно-рациональной функции и с теоремой обращения свёртки находим соответствующую временную зависимость для выражения (7):

$$p \cdot j(p) \cdot \frac{F_1(\Theta, g) \cdot F_4(\Theta, d_1)}{\Theta^3 \cdot F_2(\Theta, d_1)} \leftrightarrow \sum_{k=0}^{\infty} \left. \frac{\left(\frac{F_1(p, \lambda, g) \cdot F_4(p, \lambda, d_1)}{z^3} \right)}{\frac{dF_2(p, \lambda, d_1)}{dp}} \right|_{p=p_k} \cdot \frac{dj(t)}{dt} * e^{p_k t}. \quad (11)$$

Выражение (11) подставим в формулу (7) и выполним обратное преобразование Фурье-Бесселя. После введения новых переменных и упрощающих математических операций находим оригинал для тока, индуцированного в металле вспомогательного экрана. Кроме того, положим, что ток в витке равномерно распределён по радиусу.

$$J_1(\varphi, r) = (8d_1) \int_0^{\infty} f(x) \cdot x \cdot J_1\left(x \frac{r}{d_1}\right) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} v_k \times \quad (12)$$

$$\times \frac{F_1(\beta_k, g, x) F_4(\beta_k, x)}{\beta_k^2 F_2(\beta_k, x)} \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} * e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau_1} \varphi} \cdot dx$$

где $x = (\lambda \cdot d_1)$ новая переменная интегрирования в интеграле Фурье-Бесселя,

$$f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \cdot \frac{R_1}{d_1}}^{x \cdot \frac{R_2}{d_1}} y \cdot J_1(y) dy, \quad v_k = \begin{cases} 1, & k=0, \\ 2, & k \neq 0, \end{cases}$$

$$F_1(\beta_k, g, x) = \sin\left(\frac{\beta_k \cdot g}{2d_1}\right) \left[\sin\left(\frac{\beta_k \cdot g}{2d_1}\right) + \left(\frac{\beta_k}{x}\right) \cos\left(\frac{\beta_k \cdot g}{2d_1}\right) \right],$$

$$F_2(\beta_k, x) = \cos(\beta_k) \left[\frac{2}{x} + \left(1 - \left(\frac{\beta_k}{x}\right)^2\right) \right] - \sin(\beta_k) \times$$

$$\times \frac{2\beta_k}{x} \cdot \left(1 + \frac{1}{x}\right),$$

$$F_4(\beta_k, x) = \sin\left(\frac{\beta_k}{2}\right) \left[\sin\left(\frac{\beta_k}{2}\right) + \left(\frac{\beta_k}{x}\right) \cos\left(\frac{\beta_k}{2}\right) \right],$$

$\varphi = \omega \cdot t$, ω – круговая частота тока в индукторе.

Вычислим свёртку функций под знаком суммы в выражении (12).

Примем, что $j(\varphi) = j_m \cdot e^{-\delta_0 \varphi} \cdot \sin(\varphi)$, здесь

$$j_m = \frac{J_m}{(R_2 - R_1) \cdot g} - \text{амплитуда плотности тока в индукторе, } \delta_0 - \text{относительный декремент затухания.}$$

Теперь искомая свёртка будет определяться зависимостью:

$$\frac{dj(\varphi)}{d\varphi} * e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau_1} \varphi} = j_m \cdot F_5(\beta_k, x, \varphi), \quad (13)$$

где

$$F_5(\beta_k, x, \varphi) = e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \cdot \sin \varphi - \frac{\left(\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau_1}\right)}{\left(1 + \left(\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau_1} - \delta_0\right)^2\right)} \times \left[e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau_1} \cdot \varphi} + e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \cdot \left(\left(\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau_1} - \delta_0\right) \sin \varphi - \cos \varphi \right) \right].$$

Выражение (13) подставим в (12), получим формулу для проведения численных оценок временного и радиального распределения линейной плотности тока, возбуждаемого в металле вспомогательного экрана.

$$J_1(\varphi, r) = (8 \cdot d_1 \cdot j_m) \int_0^{\infty} f(x) \cdot x \cdot J_1\left(x \frac{r}{d_1}\right) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} v_k \times \quad (14)$$

$$\times \frac{F_1(\beta_k, g, x) F_4(\beta_k, x)}{\beta_k^2 F_2(\beta_k, x)} \cdot F_5(\beta_k, x, \varphi) \cdot dx$$

Продолжая вычисления, аналогично предыдущему, определяем оригинал линейной плотности тока в металле листовой заготовки.

$$J_2(\varphi, r) = (4d_1 j_m) \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) \int_0^{\infty} f(x) \left(1 - e^{-x \frac{d_2}{d_1}}\right) e^{-x \frac{h}{d_1}} \times \quad (15)$$

$$\times J_1\left(x \frac{r}{d_1}\right) \sum_{k=0}^{\infty} v_k \frac{F_1(\beta_k, g, x) F_3(\beta_k, x)}{\beta_k \cdot F_2(\beta_k, x)} F_5(\beta_k, x, \varphi) dx,$$

$$\text{где } F_3(\beta_k, x) = \left[\sin(\beta_k) + \left(\frac{\beta_k}{x}\right) \cos(\beta_k) \right].$$

Формулы (14) и (15) позволяют рассчитывать параметры вихревых токов в металле произвольного вспомогательного экрана и металле тонкостенной листовой заготовки.

Полученные аналитические результаты проиллюстрируем численными оценками.

Примем, что $R_1=0,03$ м, $R_2=0,04$ м $g=0,002$ м, $h=0,0005$ м, металл экрана и листовой заготовки – сталь $\gamma \approx 0,2 \cdot 10^7$ 1/Ом·м, $d_1=0,004$ м и $d_2=0,016$ м толщина экрана м, толщина заготовки $d_2=0,008$ м.

Варьирование толщины экрана позволит установить влияние его геометрии на процессы возбуждения индуцированных токов.

Пусть ёмкость, рабочая частота, относительный декремент затухания, напряжение на ёмкостном накопителе, ток в разрядном контуре, ток в индукторе на выходе согласующего устройства с коэффициентом усиления ~ 5 составляют, соответственно: $C = 1000$ Ф; $f = 2$ кГц; $\delta_0 = 0,3$; $U = 0,5$ кВ; $J_m = 3922$ А; $J_{im} = 19610$ А.

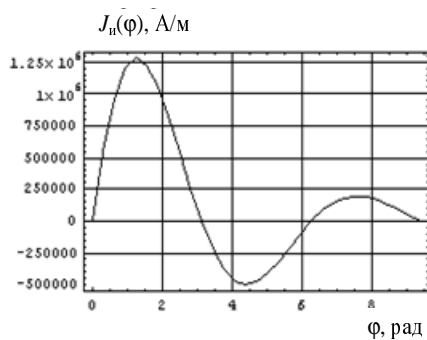


Рис. 2. Линейная плотность тока как функция фазы

Для наглядности и иллюстративности проводимых оценок на рис. 2 показана фазовая развертка линейной плотности тока в витке индуктора.

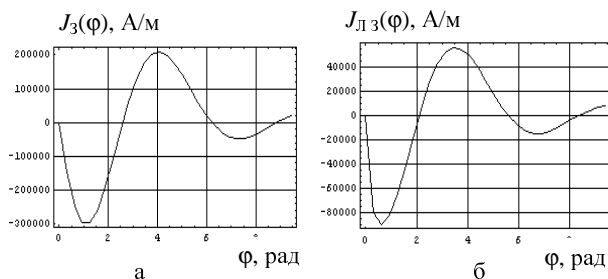


Рис. 3. Линейная плотность индуцированных токов на внутренней границе витка, $r=R_1$, а) в металле вспомогательного экрана, $d_1=0,004$ м $\approx 0,5 \cdot \Delta_1$, б) в металле листовой заготовки

Результаты вычислений приведены на рис. 3 и рис. 4, где геометрическая толщина вспомогательного экрана дана в сравнении с эффективной глубиной проникновения магнитного поля в его металл ($\Delta_1 = \sqrt{2/(\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma_1)}$).

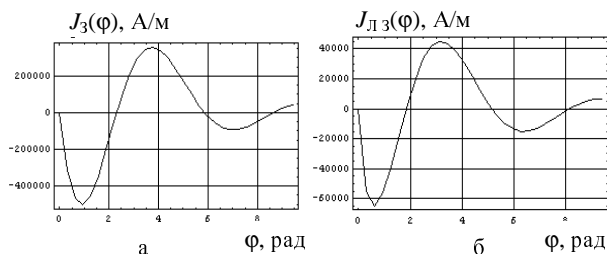


Рис. 4. Линейная плотность индуцированных токов на внутренней границе витка, $r=R_1$, а) в металле вспомогательного экрана, $d_1=0,016$ м $\approx 2 \cdot \Delta_1$, б) в металле листовой заготовки

В первом случае (рис. 3) экран в два раза тоньше, во втором (рис. 4) – в два раза толще эффективной глубины.

В соответствии с законом Ампера, возбуждаемые силы притяжения пропорциональны произведению индуцированных токов. Как показывают крайне грубые приближённые оценки, изменение их амплитуд возможно и не скажется собственно на величине развиваемых электродинамических усилий, но растущее различие во временной структуре тока в металле экрана и заготовки может привести к тому, что их силовое взаимодействие может приобрести колебательный характер (знакопеременный во времени).

Отметим, если параметры экрана и заготовки одинаковы, то индуцированные токи равны, а силы

между ними, пропорциональные квадратичной величине, сохраняют постоянное направление в течение всего времени взаимодействия.

ВЫВОДЫ

Из вычислений следует, что при увеличении толщины вспомогательного экрана относительно толщины листовой заготовки:

- растёт амплитуда тока, возбуждаемого в нём;
- падает величина и сокращается время нарастания токового импульса в листовой заготовке.

Кроме того, повышение эффективности притяжения возможно для ферромагнитных заготовок и немагнитных вспомогательных экранов. В этом случае при достаточно низких частотах возникают силы, направленные от среды с большей в сторону среды с меньшей магнитной проницаемостью. Это означает, что силам притяжения между параллельными токами добавляется сила притяжения, обусловленная магнитными свойствами объекта обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнатов А.В., Расчет низкочастотных электромагнитных процессов в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом и массивным экраном. // Электротехника и электромеханика. – Х.: 2009. – № 5. – С. 59-62.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Изд. второе, переработанное и дополненное под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. Харьков: Изд. МОСТ-Торнадо.2003. –288 с.
3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бажинов А.В., Магнитно-импульсные методы и системы для притяжения тонкостенных листовых металлов.//Труды международной научно-технической конференции "Магнитно-импульсная обработка металлов. Пути совершенствования и развития". Самара, 18-19 сентября 2007. – С. 3 – 13.
4. Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky, L.T. Khimenko, Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. P. 157-160.
5. Дж. Мэтьюз, Р. Уокер, Математические методы физики. М: Атомиздат. 1972. 390 с.

Поступила 03.06.2009

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., с.н.с.
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
61002, Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ,
кафедра "Автомобильная электроника"
тел. (8-057) 700-38-52, e-mail: kalifus@yandex.ru

A.V. Gnatov

Electromagnetic processes in an induction inductor system with a single-turn solenoid, a massive screen and a thin-wall sheetworkpiece

The article is devoted to computation of the basic characteristics of an induction inductor system with a single-turn solenoid, a massive screen and a thin-wall sheet workpiece. Analytical dependences for calculating current density in the screen and the sheet workpiece metal are obtained. Analytical results are illustrated with numeral estimations.

Key words – pulse magnetic fields, induction inductor system, massive screen, thin-wall nonferromagnetic metal sheet

КОНТРОЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ В ДВОПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Запропоновано метод періодичного контролю ізоляції в двопровідних мережах постійного струму, який ґрунтується на комбінації статичної і динамічної характеристики вимірювального експерименту. Метод дозволяє підвищити точність вимірювання омичного опору полюсів відносно землі.

Предложен метод периодического контроля изоляции в двухпроводных сетях постоянного тока, который основывается на комбинации статической и динамической характеристики измерительного эксперимента. Метод позволяет повысить точность измерения омического сопротивления полюсов относительно земли.

ВСТУП

В електроенергетиці двопровідні мережі постійного струму використовуються в якості оперативних для живлення засобів релейного захисту, автоматики, аварійної та попереджувальної сигналізації, а також електропостачання особливо відповідальних механізмів власних потреб електричних станцій та підстанцій.

Пошкодження ізоляції в двопровідних мережах постійного струму призводить до виникнення перенапруг, пожежі, вибуху, враження людей електричним струмом, тому для забезпечення надійності. Правила влаштування електроустановок та технічної експлуатації [1] передбачають використання засобів безупинного та періодичного контролю технічного стану ізоляції полюсів мережі відносно землі та пристроїв захисного вимикання.

Для неперервного контролю ізоляції широке застосування знайшли методи, що ґрунтуються на використанні врівноваженого мосту, важелями якого є опори ізоляції [2, 3, 4]. Наприклад на рис. 1 зображена принципова схема пристрою за допомогою якого здійснюється сигналізація зниження рівня ізоляції полюса мережі відносно землі за допомогою двох реле KV1 та KV2. За допомогою кнопок SB1, SB2 здійснюють вимірювання струмів, за якими визначають опори полюсів за рівняннями

$$R_1 = \frac{U_0 - (I_1 + I_2) \cdot R}{I_2};$$

$$R_2 = \frac{U_0 - (I_1 + I_2) \cdot R}{I_1};$$

де $R = R_D + R_p$; U_0 – напруга на шинах; I_1, I_2 – струм в міліамперметрі при розриві кола відповідно кнопками SB1, SB2; R_p – опір обмотки реле; R_D – додатковий опір; C – ємність полюса відносно землі.

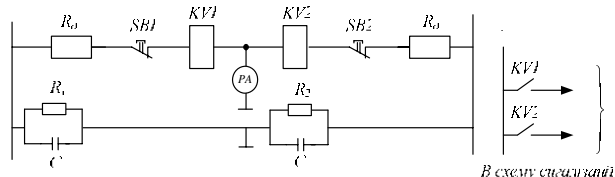


Рис. 1. Схема безупинного контролю ізоляції полюсів мережі постійного струму відносно землі

В сталому режимі, якщо гранична відносна похибка вимірювання напруги $\epsilon_u = \pm 5\%$, струму $\epsilon_I = \pm 2,5\%$, установлення опору R_D $\epsilon_R = \pm 5\%$ і

$R_D = 16$ кОм (УКІ – 1), то похибка визначення омичного опору полюса може досягти 40%.

Таким чином, не зважаючи на просту схему реалізації, мостові схеми мають відносно велику похибку при вимірюванні, штучно знижують омичний опір полюсів відносно землі, погіршують умови безпеки, не реагують на симетричне зниження опору ізоляції полюсів, реагують лише на ступінь несиметрії ізоляції полюсів відносно землі.

Крім мостових схем, широке розповсюдження отримали засоби контролю, які ґрунтуються на принципі накладання стороннього джерела живлення промислової та підвищеної частоти [5, 6] на контрольовану мережу. Недоліком цих схем контролю є суттєвий вплив ємностей мережі відносно землі, тому використовують різні методи компенсації цього впливу, що значно ускладнює пристрій і не дає бажаного результату.

МЕТА РОБОТИ

Підвищити точність визначення омичного опору полюсів відносно землі шляхом спрощення алгоритму визначення омичного опору, зменшення впливу ємності ізоляції мережі на результати вимірювання і дублювання вимірювального експерименту.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метод періодичного контролю передбачає вимірювання напруги U_{xx} та струму $I_{к.з.}$ між загальною точкою дільником напруги та землею за результатами значень яких обчислюється загальний опір мережі відносно землі. Для визначення опору ізоляції полюса відносно землі використовується додатково режим введення між полюсом мережі і землею незарядженого конденсатора з ємністю C та вимірювання максимального значення струмів $i_1(0)$, $i_2(0)$ заряду конденсатора і напруги між полюсами контрольованої мережі U_0 . За відношенням цих величин визначають опір полюса мережі відносно землі. Розрахункова схема показана на рис. 2. Якщо знехтувати впливом внутрішнім опором амперметра і вольтметра на результати вимірювання, то напругу між загальною точкою дільника і землею визначають як (рис. 2)

$$U_e = \frac{U_0}{2(R_1 + R_2)}(R_2 - R_1), \quad (1)$$

а струм

$$I = \frac{U_0 \cdot (R_2 - R_1)}{2R_1R_2 + R_D(R_1 + R_2)}, \quad (2)$$

тоді загальний опір між полюсами мережі і землею

$$R_{i3.B} = \frac{U_B}{I} = \frac{2R_1R_2 + R_D(R_1 + R_2)}{2(R_1 + R_2)} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_D}{2} = R_{i3} + \frac{R_D}{2},$$

де R_D – опір плеча дільника.

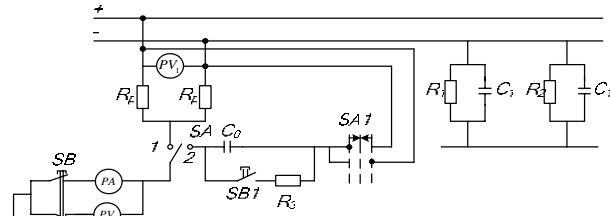


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення омичного опору полюсів мережі відносно землі

Таким чином

$$R_{i3} = \frac{U_B}{I} - \frac{R_D}{2} \quad (3)$$

Для визначення опору ізоляції кожного полюса відносно землі, визначимо перехідні струми $i_1(t)$, $i_2(t)$ при почерговому підключенні незарядженого конденсатора C_0 (рис. 1) між додатнім та від'ємним полюсом мережі за допомогою перемикача SA1

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= \frac{U_0}{R_2(1 + 2C_0/C)^2} e^{-t/\tau} \\ i_2(t) &= \frac{U_0}{R_1(1 + 2C_0/C)^2} e^{-t/\tau} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $\tau = \frac{R_2R_1(C_0 + 2C)}{R_1 + R_2}$ – постійна часу.

Максимальне значення струму має в першій момент підмикання конденсатора до полюса мережі, тобто при $t = 0$. Із системи рівнянь (4) маємо:

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= \frac{U_0}{i_1(0)(1 + 2C_1/C)^2} \\ R_1 &= \frac{U_0}{i_2(0)(1 + 2C_1/C)^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В реальних умовах значення C_0 не обмежують, тому можна підібрати його значення так, щоб $2C/C_0 \rightarrow 0$, тоді

$$R_2 = \frac{U_0}{i_1(0)}; R_1 = \frac{U_0}{i_2(0)},$$

тобто алгоритм визначення загального опору R_{i3} і опору ізоляції окремих полюсів значно спрощується, а ємність мережі не впливає на результати вимірювань.

Алгоритм визначення опору ізоляції полюсів полягає в наступному (рис. 2). Після підключення пристрою між полюсами мережі і землею за допомогою кнопки SB1 розряджають конденсатор C_0 . Перемикач SA ставлять в положення 1. Вимірюють напругу U_B між загальною точкою дільника і землею. Якщо $U_B > 0$, то натискають на кнопку SB і вимірюють струм I . Потім перемикач SA перемикають в положення 2, SA1 ставлять в положення 1 і натискають на кнопку SB вимірюють величину струму $i_1(0)$, а в положенні SA1 – 2 при натисканні кнопки SB – $i_2(0)$,

напругу U_0 вимірюють за допомогою вольтметра PV1. При підключенні конденсатора C_0 між полюсом мережі і землею він попередньо повинен бути повністю розряджений (кнопка SB1, резистор R_3).

За результатами вимірювань по формулам (3), (5) визначають R_{i3} , R_1 , R_2 перевіряють чи співпадають результати $R_{i3} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$. Якщо в результаті вимірювання $U_B = 0$, то це означає, що ізоляція симетрична, тобто $R_1 = R_2$ і достатньо виміряти $i_1(0)$, $i_2(0)$ і U_0 .

Проведемо дослідження методичної похибки вимірювання загального опору ізоляції R_{i3} і окремих полюсів відносно землі R_1 , R_2 .

Середньоквадратичну похибку визначення R_{i3} можна знайти із виразу

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Ri3} &= \sqrt{\left(\frac{\partial R_{i3}}{\partial U_B} \frac{dU_B}{R_{i3}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{i3}}{\partial I} \frac{dI}{R_{i3}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{i3}}{\partial R_D} \frac{dR_D}{R_{i3}}\right)^2} = \quad (6) \\ &= \sqrt{\varepsilon_I^2 + \varepsilon_{U_B}^2 + \varepsilon_{R_D}^2}, \end{aligned}$$

Із виразу (6) видно, що похибка визначення R_{i3} залежність від точності вимірювання, напруги U_B , струму I і установки R_D .

Враховуючи те, що внутрішній опір вимірювальних приладів має кінцеве значення визначимо величину U_B і I . Опускаючи проміжні перетворення отримуємо

$$\begin{aligned} U_{BX} &= \frac{U_0}{\left(\frac{R_D}{R_V} + \frac{2R_1}{R_V} + 2\right)} \cdot \frac{(R_2 - R_1) \left(\frac{R_D}{2R_V} + 1\right) + \frac{R_1R_2 - R_1^2}{R_V}}{\left(R_1 + R_2\right) \left(\frac{R_D}{2R_V} + 1\right) + \frac{R_1R_2}{R_V}} = \quad (7) \\ &= \frac{U_0 \cdot (R_2 - R_1)}{2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{R_D + 2R_{i3}}{2R_V} + 1\right)} = U_D \cdot k, \end{aligned}$$

де R_V – внутрішній опір вольтметра, а U_D – дійсне значення вимірювальної напруги: $U_D = \frac{U_0 \cdot (R_2 - R_1)}{2} \cdot \frac{1}{R_1 + R_2}$;

$$k = \frac{1}{\left(\frac{R_D + 2R_{i3}}{2R_V} + 1\right)}.$$

Визначимо значення струму

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{U_0}{(R_D + 2R_1 + 2R_a)} \cdot \left[1 - \frac{2R_1(R_D + R_1 + 2R_a)}{(R_1 + R_2)(R_D + 2R_a) + 2R_1R_2}\right] = \quad (8) \\ &= \frac{U_0(R_2 - R_1)}{(R_1 + R_2)(R_D + 2R_a) + 2R_1R_2}, \end{aligned}$$

де R_a – внутрішній опір амперметра.

Використовуючи рівняння (7), (8), визначимо граничні відносні похибки, що виникають при вимірюванні напруги та струму

$$\begin{aligned} \varepsilon_U &= |\varepsilon_V| + \left|\frac{U_D - U_B}{U_B}\right| = |\varepsilon_V| + |1 - k_U|; \\ \varepsilon_i &= |\varepsilon_i| + \left|\frac{I_D - I_B}{I_D}\right| = |\varepsilon_i| + |1 - k_i|, \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{U_0(R_2 - R_1)}{(R_1 + R_2)R_D + 2R_1R_2}; \\ k_i &= \frac{I_B}{I_D} = \frac{R_D + 2R_{i3}}{R_D + 2R_{i3} + 2R_a} \end{aligned}$$

Для визначення числових величин похибки введемо обмеження. В широко розповсюдженому пристрої УКІ – 1 [2] $R_d = 15$ кОм. Критичне значення опору ізоляції полюсів відносно землі [1] визначимо виходячи з мінімально допустимого опору полюса відносно землі $R_{\Pi} = 30$ кОм, тоді при симетрії ізоляції $R_{i3} = 15$ кОм. Внутрішній опір цифрових вольтметрів визначаємо як $R_V \approx 10$ кОм/В, тоді для вимірювання максимального значення напруги $U_{v \max} = U_0 = 230$ В, $R_V \approx 2300$ кОм. Внутрішній опір цифрових амперметрів не перевищує $R_a \leq 100$ Ом. Виходячи з цих обмежень, методичною похибкою вимірювання струму можна знехтувати, так як в самому несприятливому випадку $R_{i3} \rightarrow 0$, $k_i = 0,006$. Методична похибка вимірювання напруги для граничного випадку $R_{i3} \leq 500$ кОм $\varepsilon_{U_M} \leq 0,18$ для критичного опору $\varepsilon_{U_M} = 0,01$, тобто в критичному випадку методична похибка вимірювання напруги не перевищує 1%. Якщо вибрати вимірювальну систему так, щоб $\varepsilon_V = \varepsilon_i = 1\%$, а похибку визначення R_d , як $\varepsilon_{R_d} = 5\%$, то загальна похибка визначення $\varepsilon_{R_{i3}}$ згідно (6) в критичному випадку $\varepsilon_{R_{i3}} = 5,4\%$.

Гранична відносна похибка – визначення опору ізоляції окремих полюсів:

$$\varepsilon_{R_1} = \frac{1}{R_1} \left[\left| \frac{R_1}{U_0} dU_0 \right| + \left| \frac{R_1}{i_2(0)} di_2(0) \right| + \left| \frac{R_1}{C_0} dC_0 \right| \right];$$

$$\varepsilon_{R_2} = \frac{1}{R_2} \left[\left| \frac{R_2}{U_0} dU_0 \right| + \left| \frac{R_2}{i_1(0)} di_1(0) \right| + \left| \frac{R_2}{C_0} dC_0 \right| \right];$$

або враховуючи систему рівнянь (5)

$$\varepsilon_{R_1} = \varepsilon_{R_2} = |\varepsilon_{U_0}| + |\varepsilon_{i(0)}| + \left| \varepsilon_C \frac{2m^2}{1+m+m^2} \right|$$

де ε_{U_0} , $\varepsilon_{i(0)}$ – граничні відносні похибки вимірювання напруги та струму і визначаються класом точності вимірювальних пристроїв; ε_C – гранична відносна похибка установки додаткової ємності C : $m = 2C/C_0$.

Вибір величин ємностей не обмежений, наприклад при максимально можливому значенні $C \leq 20$ мкФ (оперативні мережі постійного струму атомних електричних станцій і $C_0 \leq 1000$ мкФ, $m = 0,04$ і впливом ємності C можна знехтувати. Похибка методу вимірювання буде залежати лише від класу точності вимірювальних систем напруги і струму.

ВИСНОВКИ

Для підвищення точності вимірювання омичного опору ізоляції полюсів в двопровідній мережі постійного струму доцільно використовувати комбінацію статичної і динамічної характеристики вимірювального експерименту і дублювання. Це дозволяє виключити вплив ємності мережі на результати вимірювань і похибку від не співпадаючих з часом вимірювань при коливанні напруги і зміні навантаження двопровідної мережі постійного струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- ГДК 34.20.507 – 2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила: Об'єднання енергетичних підприємств "Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики", Київ, - 2003, - 329 с.
- Цапенко Е.Ф. Контроль ізоляції в сетях до 1000 В. – М.: Энергия. 1972 – 130 с.
- Беркович М.А., Основы техники релейной защиты/ Беркович М.А., Молчанов В.В., Семенов В.А.: - 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат 1984 – 367 с. ил. – Библиогр. С. 369 - 373.
- Трояновский В.А. Установка для непрерывного контроля изоляции в сетях постоянного тока // Промышленная энергетика. – 1962. - №6. – С. 14 – 15.
- Шайн А.Д., Менакер Б.Ф., Стеркин И.С. Селективный контроль изоляции в сети оперативного тока // Промышленная энергетика. – 1975. - №1. – С. 61 – 63.
- Кутин В.М. Диагностирование электрических распределительных сетей / В.М.Кутин, О.И.Кульматицкий – К.: Техніка, 1993 – 160 с. Библиография с. 160 – ISBN №5-335-00668-4.
- Система діагностики розподільних мереж постійного струму станцій і підстанцій / Кутін В.М., Рубаненко О.С., Ештіба Алі Мусбах, Аль Нсур Мохамед. // Вісник Вінницького політехнічного інституту - 1994. - № 2. - С. 51-56.

Надійшла 20.08.2009

Добровольська Любов Наумівна, к.т.н., доц.
тел. 8 (050) 6717283, e-mail: lsobchuk@mail.ru

Романюк Микола Валентинович
тел. 8 (063) 8310564, e-mail: nickrom86@mail.ru
Луцький національний технічний університет
Кафедра електропостачання,
Україна, 43018, Луцьк, вул. Львівська, 75

L.N. Dobrovolska, M.V. Romanyuck

Insulation monitoring in dc two-wire networks

A periodic check technique for dc two-wire network insulation is introduced, the technique based on combination of static and dynamic characteristics obtained in a test experiment. The technique allows improving accuracy of poles ohmic resistance measurement about the ground.

Key words – dc two-wire networks, insulation monitoring, check technique, poles ohmic resistance measurement accuracy

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ, ДЕФОРМИРУЮЩИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ОБОЛОЧКУ ПРИ "СРЕЗЕ" ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ

Зроблено критеріальний аналіз впливу швидкості "зрізу" імпульсу зовнішнього магнітного поля на амплітуди від'ємного та додатного тиску після "зрізу", що діють на розташовану всередині індуктору циліндричну провідну оболонку. Визначено параметри "зрізаючого" імпульсу, для котрих у схемі Г. Фюрза демпфування струму або замикання індуктору накоротко не обов'язкові.

Сделан критериальный анализ влияния скорости "среза" импульса внешнего магнитного поля на амплитуды отрицательных и положительных давлений после "среза", действующих на расположенную внутри индуктора цилиндрическую проводящую оболочку. Определены параметры "срезающего" импульса, при которых в схеме Г. Фюрза демпфирование тока или замыкание индуктора накоротко не обязательны.

ВВЕДЕНИЕ

В 1965 г. Г. Фюрз получил патент на устройства для магнитно-импульсной обработки металлических заготовок силами притяжения к индуктору [1]. Эти устройства позволяют расширять недоступные внутри металлические трубы и закрытые сосуды при помощи внешнего индуктора. Принцип их действия основан на прерывании медленно нарастающего (исходного) импульса разрядного тока, протекающего через индуктор с расположенной вблизи него заготовкой (в дальнейшем процесс прерывания будем называть "срезом" импульса). До "среза" на заготовку действуют относительно небольшие электродинамические усилия (ЭДУ), стремящиеся сжать заготовку, или оттолкнуть её от индуктора, но не вызывающие пластическую деформацию. На стадии "среза" быстрое ослабление внешнего магнитного поля приводит к изменению направления вихревых токов в заготовке и возникновению больших притягивающих к индуктору ЭДУ, которые деформируют заготовку и могут быть увеличены при помощи специальной вторичной обмотки.

Поясним один из способов "среза" импульса, предложенный Г. Фюрзом [1] (рис. 1 и 2).

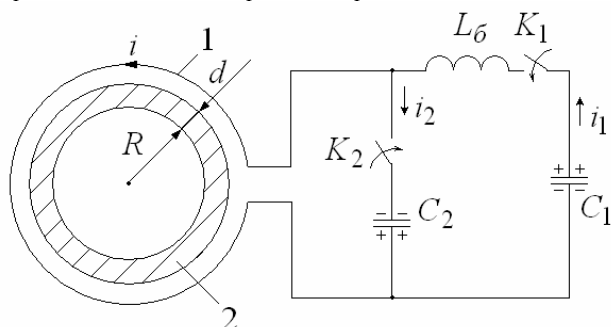


Рис. 1. Схема устройства с прерыванием тока при помощи дополнительного емкостного накопителя

Исходный импульс тока i_1 создаётся разрядом основного емкостного накопителя C_1 через управляемый коммутатор K_1 на индуктор 1 с расположенной внутри него цилиндрической проводящей оболочкой (заготовкой) 2. В некоторый момент времени $t = t_c$ включается управляемый коммутатор K_2 , и дополни-

тельный емкостный накопитель C_2 , полярность обкладок которого относительно индуктора 1 противоположна полярности C_1 , создаёт "срезающий" импульс тока i_2 , имеющего противоположное направление. Согласно [1] $C_2 \ll C_1$, а зарядное напряжение C_2 может быть намного выше, чем та же величина для C_1 . Индуктивность L_6 предотвращает короткое замыкание дополнительного накопителя C_2 через C_1 .

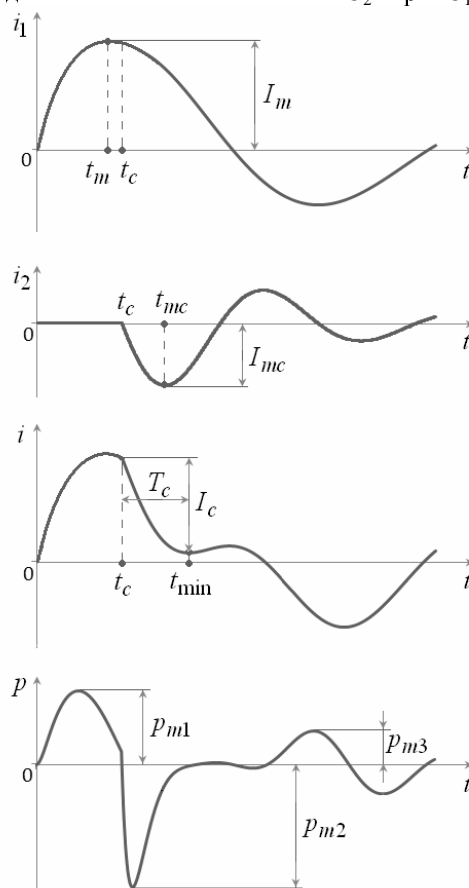


Рис. 2. Исходный (i_1), "срезающий" (i_2) и "срезанный" (i) импульсы тока, а также давление магнитного поля на оболочку (p) при колебательном разряде C_1 и C_2

Будем характеризовать "срез" исходного импульса такими величинами (см. рис. 2): T_c – длительность (продолжительность) "среза",

$$T_c = t_{\min} - t_c, \quad (1)$$

t_{\min} – момент времени, в который "срезанный" импульс имеет первое минимальное значение; I_c – амплитуда "среза",

$$I_c = i(t_c) - i(t_{\min}). \quad (2)$$

Для предотвращения колебаний тока i после "среза" (см. рис. 2) автором изобретения [1] предложено использовать демпфирующий резистор или вспомогательный коммутатор, с помощью которого индуктор замыкается накоротко при $i(t) = 0$ (эти устройства на рис.1 не показаны). Кроме того, даны такие рекомендации для временных характеристик t_c, T_c :

$$t_c \gg \tau_F, T_c \ll \tau_F, \quad (3)$$

где τ_F – постоянная времени, характеризующая скорость проникновения электромагнитного поля внутрь оболочки (предположительно, т.к. в [1] не приводится вывод формул для расчета τ_F , в которых могут быть опечатки) и зависящая от её размеров и удельной электропроводности.

Для практической реализации схемы без демпфирующего резистора и вспомогательного коммутатора (см. рис. 1) необходимо определить формы исходного и "срезающего" импульсов, их временные характеристики и амплитуды. В соотношениях (3) они не учитываются. Кроме того, могут появиться значительные ЭДУ, сжимающие заготовку после её расширения [2].

Целью данной работы является определение основных параметров исходного и "срезающего" колебательных импульсов, которые обеспечивают необходимое расширение цилиндрической оболочки с помощью внешнего индуктора при допустимых сжимающих ЭДУ.

ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ, РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ И КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ

Представляем "срезанный" импульс тока в разрядном контуре (см. рис.1) в виде суммы двух слагаемых:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t), \quad (4)$$

где

$$i_1(t) = I_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t; \quad (5)$$

$$i_2(t) = -1(t-t_c) I_{01} e^{-\alpha_1 t} \sin \omega_1 t; \quad (6)$$

$1(t-t_c)$ – единичная функция,

$$1(t-t_c) = \begin{cases} 1, & t > t_c; \\ 0, & t \leq t_c; \end{cases} \quad (7)$$

I_0, I_{01} – постоянные; α, α_1 – коэффициенты затухания; ω, ω_1 – круговые (угловые) частоты.

Пусть длина индуктора $b \gg R$ (R – внутренний радиус оболочки), а влиянием междувитковых зазоров можно пренебречь. Тогда магнитное поле в непроводящих областях системы индуктор – проводящая оболочка близко к однородному, а напряженность магнитного поля на внешней поверхности оболочки согласно (4) равна

$$H(0,t) = H^{(1)}(0,t) + H^{(2)}(0,t), \quad (8)$$

где $H^{(1)}(0,t), H^{(2)}(0,t)$ – напряженности магнитного поля, обусловленные протеканием по индуктору токов соответственно $i_1(t), i_2(t)$,

$$H^{(1),(2)}(0,t) = \frac{i_{1,2} w}{b};$$

w – число витков индуктора.

Пусть также оболочка неподвижна, имеет постоянные электрофизические характеристики, и соблюдаются условия квазистационарности. Кроме того, толщина оболочки $d \ll R$. Используем переходную функцию напряженности магнитного поля, проникшего внутрь оболочки, первого приближения [3,4]

$$H_1(d,t) = 1 - e^{-t/\tau}, \quad (9)$$

где τ – постоянная времени первого приближения,

$$\tau = \mu_0 \gamma R d / 2;$$

μ_0 – магнитная постоянная; γ – удельная электропроводность оболочки.

При помощи переходной функции (9) и интеграла Дюамеля для токов $i_{1,2}(t)$, представленных зависимостями (5), (6), с учетом нулевых начальных условий получаем такие формулы:

$$H^{(1)}(d,t) = \frac{I_0 w}{b} \frac{1}{\sqrt{(1-\alpha\tau)^2 + (\omega\tau)^2}} \times \\ \times \left[e^{-\alpha t} \sin(\omega t - \psi_2^{(1)}) + e^{-t/\tau} \sin \psi_2^{(1)} \right]; \quad (10)$$

$$H^{(2)}(d,t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_c; \\ H_c(d,t'), & t > t_c; \end{cases} \quad (11)$$

$$H_c(d,t') = -\frac{I_{01} w}{b} \frac{1}{\sqrt{(1-\alpha_1\tau)^2 + (\omega_1\tau)^2}} \times \\ \times \left[e^{-\alpha_1 t'} \sin(\omega_1 t' - \psi_2^{(2)}) + e^{-t'/\tau} \sin \psi_2^{(2)} \right], \quad (12)$$

где $t' = t - t_c$;

$$\psi_2^{(1)} = \begin{cases} \arctg \frac{\omega\tau}{1-\alpha\tau}, & \text{если } \alpha\tau < 1; \\ \pi/2, & \text{если } \alpha\tau = 1; \\ \pi + \arctg \frac{\omega\tau}{1-\alpha\tau}, & \text{если } \alpha\tau > 1. \end{cases} \quad (13)$$

Для расчета $\psi_2^{(2)}$ используем выражение (13), в котором следует заменить α и ω соответственно на α_1 и ω_1 (формулы (10), (13) были приведены в работе [4]). Применяя принцип суперпозиции, получаем напряженность магнитного поля внутри оболочки, обусловленную "срезанным" импульсом тока (4):

$$H(d,t) = H^{(1)}(d,t) + H^{(2)}(d,t). \quad (14)$$

ЭДУ, действующие на проводящую оболочку, будем характеризовать величиной

$$p(t) = \frac{\mu}{2} \left[(H(0,t))^2 - (H(d,t))^2 \right], \quad (15)$$

условно называемой давлением магнитного поля. В дальнейшем полагаем $\mu = \mu_0$. Заметим, что положительное давление сжимает оболочку, а отрицательное – расширяет.

В формулы (4) – (15), которые описывают сило-

вое воздействие импульсного электромагнитного поля на проводящую оболочку при колебательных исходном и "срезающем" импульсах тока, входят десять размерных величин: α , ω , α_1 , ω_1 , I_0 , I_{01} , b , τ , t , t_c . Из них составляем семь критериев подобия [5]: $\alpha^* = \alpha/\omega$, $\alpha_1^* = \alpha_1/\omega_1$, $\omega_1^* = \omega_1/\omega$, $I_{01}^* = I_{01}/I_0$, $\tau^* = \omega\tau$, $t^* = \omega t$, $t_c^* = \omega t_c$. Поясним физический смысл и определим значения отдельных критериев.

Три критерия – τ^* , t^* и t_c^* образованы делением соответствующих величин, имеющих размерность времени, на величину ω^{-1} , являющуюся базисным временем. Поэтому t^* – безразмерное время, а t_c^* – безразмерное значение времени, соответствующее началу "среза" (см. рис.2). Критерий τ^* характеризует проникновение импульсного магнитного поля внутрь проводящей оболочки [4]. Амплитуда напряженности этого поля $H^{(1)}(d,t)$, обусловленного исходным импульсом тока (5), имеет наибольшие значения при $\tau^* \leq 0,4$, поэтому принимаем $\tau^* = 0,1$. При таком τ^* на первой стадии процесса импульсы внешнего и проникшего внутрь оболочки магнитных полей отличаются незначительно (рис. 3, а, б). Для достижения наибольших ЭДУ, расширяющих оболочку, рекомендуется значение критерия $t_c^* = t_{mi}^*$ (t_{mi} – момент времени, соответствующий амплитудному значению $H^{(1)}(d,t)$, $t_{mi}^* = \omega t_{mi}$) [6]. Для принятого значения τ^* возможно и $t_c^* = t_m^*$ (t_m – момент времени, соответствующий амплитуде исходного импульса тока I_m , $t_m^* = \omega t_m$) [7].

Четыре критерия – α^* , α_1^* , ω_1^* и I_{01}^* определяют форму "срезанного" импульса.

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ОБОЛОЧКУ

Очевидно, что величина ЭДУ, расширяющих оболочку, зависит от скорости "среза" исходного импульса тока, которая изменяется во времени и принимает максимальное значение в начальной стадии "среза". Чем выше скорость "среза", тем больше вихревые токи в оболочке и соответственно ЭДУ. Используя (4) – (6), можно показать, что скорость "среза" является функцией критериев α^* , α_1^* , ω_1^* , I_{01}^* и t^* , а её максимальное значение – функцией первых четырех из них. Критерий α^* влияет на форму исходного импульса и существенно зависит от параметров элементов разрядного контура, прежде всего, системы индуктор – оболочка, а также емкостного накопителя C_1 , коммутатора K_1 , индуктивности L_0 и соединяющих их проводников (см. рис. 1). Заметим также, что круговая частота исходного импульса, от которой зависит α^* , определяется постоянной τ и выбранным

значением критерия τ^* . Поэтому в дальнейшем полагаем, что α^* принимает некоторое заданное значение. Из рис.2 следует, что скорость "среза" можно приближенно оценить отношением I_c/T_c . С повышением круговой частоты "срезающего" импульса уменьшаются t_{mc} , а следовательно, t_{min} и согласно (1) – T_c , так как $t_{mc} = t'_{mc} + t_c$, $t'_{mc} = (\pi/2 - \arctg \alpha_1^*)/\omega_1$ (t_{mc} – момент времени, в который достигается амплитудное значение "срезающего" импульса I_{mc} ; величина t'_{mc} имеет смысл момента времени, соответствующего I_{mc} , относительно начала "среза"). Заметим также, что t'_{mc} , а следовательно, и T_c уменьшаются с увеличением α_1^* . Числитель отношения I_c/T_c возрастает с увеличением I_{mc} . Таким образом, увеличения скорости "среза" и соответственно ЭДУ, расширяющих оболочку, можно достичь увеличением значений ω_1^* , α_1^* и I_{01}^* . Это утверждение, а также предшествующие ему доводы иллюстрируются данными рис. 3, 4 и табл. 1, 2, которые представлены с использованием таких безразмерных величин: $i^* = i/I_0$; $t_{min}^* = \omega t_{min}$; $T_c^* = \omega T_c$; $t'_{mc} = \omega t'_{mc}$; $I_c^* = I_c/I_0$; $p^* = p/(\mu_0 H_0^2/2)$, $H_0 = I_0 w/b$; $\eta^* = \eta/H_0$ (η – линейная плотность вихревых токов в оболочке [7]). Дополнительно приняты обозначения (см. рис. 2): p_{m1} , p_{m2} и p_{m3} – амплитуды соответственно первой (положительной), второй (отрицательной) и наибольшей после "среза" положительной полуволны давления магнитного поля, действующего на оболочку.

На рис. 3,4 и в табл.1 показано влияние на рассматриваемые процессы круговой частоты ω_1 и амплитуды I_{mc} "срезающего" импульса, которые изменялись вариацией значений критериев ω_1^* и I_{01}^* . Отношение амплитуд "срезающего" и исходного импульсов и критерий I_{01}^* связаны очевидной зависимостью

$$I_{mc}/I_m = I_{01}^* \exp \left[\alpha^* \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \alpha^* \right) - \alpha_1^* \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \alpha_1^* \right) \right] \times \sin \left(\pi/2 - \arctg \alpha_1^* \right) / \sin \left(\pi/2 - \arctg \alpha^* \right).$$

Отношения p_{m2}/p_{m1} и p_{m3}/p_{m1} будем называть соответственно кратностью амплитуды отрицательного давления и кратностью амплитуды положительного давления после "среза". Видим, что даже при низкой круговой частоте ω_1 достигнуты относительно большие значения кратности амплитуды отрицательного давления при малых значениях p_{m3}/p_{m1} (рис. 3, г; рис. 2, для кривых которого $\omega_1^* = 2$, $I_{01}^* = 1,5$; табл. 1, $\omega_1^* = 2$). При этом не обязательно условие $C_2 \ll C_1$ [1]. С повышением круговой частоты ω_1 при тех же амплитудах "срезающего" импульса имеем существ-

венно большие значения кратности p_{m2}/p_{m1} , но при этом кратность положительного давления после "среза" возрастает и превосходит единицу (рис. 4, г; табл. 1, $\omega_1^* = 5$).

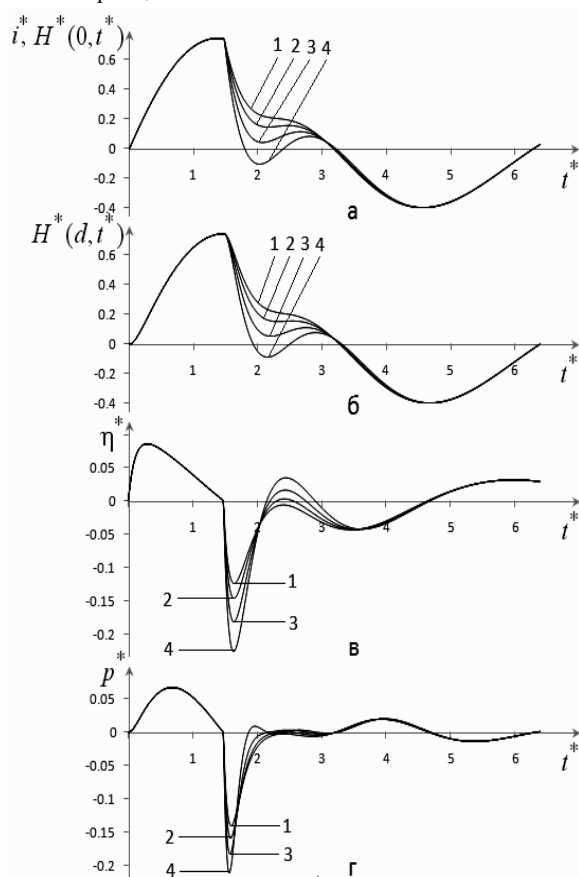


Рис. 3. Влияние амплитуды "среза" при $\omega_1^* = 2$, $\alpha^* = 0,2$, $\alpha_1^* = 0,8$, $t_c^* = t_{mi}^* = 1$, 47508:
1 – $I_{01}^* = 1$, 2 – 1,2, 3 – 1,5, 4 – 1,9

При низкой круговой частоте ω_1 "срезанный" импульс может не иметь точки t_{\min} (см. рис. 3, а, кривая 1), поэтому для этого частного случая необходимо иное определение продолжительности "среза" T_c (см. формулу (1); подробно этот вопрос здесь не рассматривается, а в табл. 1 соответствующие значе-

ния T_c^* и I_c^* не приведены). Кроме того, наибольшая по амплитуде после "среза" положительная полуволна давления появляется после нескольких несущественных колебаний (см. рис. 3, г; рис. 2). При более высокой круговой частоте ω_1 точка t_{\min} чётко выражена (см. рис. 4, а), причем значения T_c и t'_{mc} весьма близки (см. табл. 1, $\omega_1^* = 5$). Последнее показывает большее влияние высокочастотного "срезающего" импульса на продолжительность "среза", чем низкочастотного, при котором T_c существенно больше t'_{mc} (см. табл.1, $\omega_1^* = 2$). Третья, положительная полуволна давления имеет наибольшую амплитуду после "среза" (см. рис. 4, г).

"Срезанные" импульсы на рис. 4,а можно назвать также импульсами с "вырезом", так как их форма после "выреза" практически не отличается от формы исходного импульса (кривые 1 – 4 совпадают). Импульсы с "вырезом" были изображены в описании патента [8] на устройства для выравнивания вмятин на поверхностях изделий из тонких металлических листов и труб, принцип действия которых основан на описанной выше идее в изобретении Г. Фюрза [1]. Авторы изобретения [8] рекомендуют $t_c/T_c = 40 \div 100$. Полученные нами данные показывают возможность получения больших значений p_{m2}/p_{m1} при $t_c/T_c \cong 3 \div 8$ (см. табл. 1).

В табл. 2 показано влияние на рассматриваемые процессы затухания "срезающего" импульса тока (критерия α_1^*). Для каждого значения α_1^* определяли такую величину критерия I_{01}^* , при которой амплитуда "среза" принимала одно и то же значение $I_c = I_m$. При этом изменение скорости "среза" достигалось непосредственным влиянием α_1^* на длительность "среза". С увеличением α_1^* наблюдаем возрастание отрицательного давления и уменьшение положительного давления. В случае слабого затухания исходного импульса и отрицательное, и положительное давления после "среза" существенно выше.

Таблица 1

Основные характеристики "срезанного" импульса тока и давления магнитного поля при $\alpha^* = 0,2$, $\alpha_1^* = 0,8$, $t_c^* = t_{mi}^*$

ω_1^*	I_{01}^*	I_{mc}/I_m	T_c^*	t'_{mc}	I_c^*	p_{m2}/p_{m1}	p_{m3}/p_{m1}
2	1	0,51176	–	0,44803	–	-2,0973	0,28828
	1,2	0,61411	0,68492		0,5944	-2,37195	0,28987
	1,5	0,76764	0,59492		0,69829	-2,73851	0,29269
	1,9	0,97234	0,55492		0,84413	-3,15757	0,29702
5	1	0,51176	0,19492	0,17921	0,40802	-3,14126	0,9183
	1,2	0,61411	0,19492		0,48391	-3,53234	1,13638
	1,5	0,76764	0,18492		0,59804	-4,01299	1,42725
	1,9	0,97234	0,18492		0,75045	-4,54351	1,76461

Основные характеристики "срезанного" импульса тока и давления магнитного поля при $\omega_1^* = 2, t_c^* = t_m^*$

$\alpha^*; t_m^*; P_{m1}^*$	α_1^*	I_{01}^*	I_{mc}/I_m	t_{min}^*	T_c^*	t_{mc}^*	P_{m2}/P_{m1}	P_{m3}/P_{m1}
0,2; 1,37260; 0,06654	0,1	0,57980	0,66840	2,40501	1,03240	0,73556	-1,67384	0,78003
	0,2	0,70900	0,70900	2,33301	0,96041	0,68670	-1,85111	0,52096
	0,4	1,01250	0,78379	2,17502	0,80242	0,59514	-2,22357	0,35301
	0,8	1,72900	0,88483	1,91003	0,53743	0,44803	-2,90392	0,30406
0,8; 0,89526; 0,02806	0,1	0,27950	0,62961	1,89203	0,99677	0,73556	-1,01894	0,18964
	0,2	0,33990	0,66418	1,83603	0,94077	0,68670	-1,11297	0,12627
	0,4	0,48470	0,73318	1,70902	0,81377	0,59514	-1,32116	0,06982
	0,8	0,84370	0,84370	1,46001	0,56475	0,44803	-1,73417	0,06342

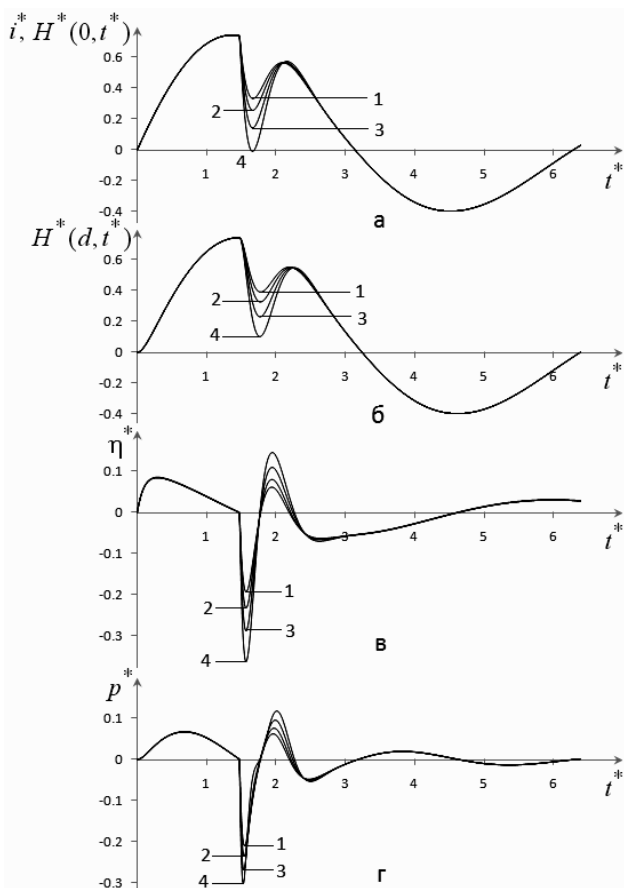


Рис. 4. Влияние амплитуды "среза" при $\omega_1^* = 5, \alpha^* = 0,2, \alpha_1^* = 0,8, t_c^* = t_{mi}^* = 1, 47508$:
1 – $I_{01}^* = 1, 2 - 1,2, 3 - 1,5, 4 - 1,9$

В табл. 3 приведены основные характеристики рассматриваемого процесса в случае идеального "среза", при котором ток i в момент времени $t = t_c$ скачкообразно изменяется от $i(t_c)$ до нуля [6]. Данные в числителях 5, 6, 11 и 12 строк получены при $t_c = t_m$, в знаменателях – $t_c = t_{mi}$ (соответствующие значения t_m^* имеются в табл. 2). Расчеты выполнены при помощи используемой в этой статье модели первого приближения и точной модели, в которой учитывается неравномерность распределения вихревых токов по

толщине оболочки [4,6]. Для того, чтобы в точной модели сохранить значение $\tau^* = 0,1$, принято $d/R = 0,05, d/\Delta = 0,0707$ (Δ – глубина проникновения электромагнитного поля [9]). Расхождения между значениями основных характеристик, полученными при помощи различных моделей, не превосходят ~ 5% (они наибольшие, как и следовало ожидать, для величины P_{m1}^* , имеющей место в начальной стадии процесса), что является оценкой погрешности модели первого приближения в случаях реальных "срезающих" импульсов.

Таблица 3

Основные характеристики импульсов давления и напряженности магнитного поля, проникшего внутрь оболочки, при идеальном "срезе"

Величина	Модель первого приближения	Точная модель	Расхождение, %
$\alpha^* = 0,2$			
$H^*(d, t_m^*)$	0,737	0,736	0,1
t_{mi}^*	1,475	1,480	0,3
$H^*(d, t_{mi}^*)$	0,741	0,741	0,0
P_{m1}^*	0,0665	0,0699	4,9
P_{m2}^*	$\frac{-0,543}{-0,549}$	$\frac{-0,542}{-0,549}$	$\frac{0,2}{0,0}$
$\frac{P_{m2}}{P_{m1}}$	$\frac{-8,16}{-8,26}$	$\frac{-7,75}{-7,85}$	–
$\alpha^* = 0,8$			
$H^*(d, t_m^*)$	0,374	0,373	0,3
t_{mi}^*	1,004	1,010	0,6
$H^*(d, t_{mi}^*)$	0,378	0,378	0,0
P_{m1}^*	0,0280	0,0294	4,8
P_{m2}^*	$\frac{-0,140}{-0,143}$	$\frac{-0,139}{-0,143}$	$\frac{0,7}{0,0}$
$\frac{P_{m2}}{P_{m1}}$	$\frac{-5,00}{-5,11}$	$\frac{-4,73}{-4,86}$	–

Поскольку скорость идеального "среза" не ограничена, то значения p_{m2}/p_{m1} в табл. 3 являются предельными для соответствующих исходных импульсов тока. Например, при $\alpha^* = 0,2$ модуль кратности амплитуды отрицательного давления в случае идеального "среза" равен ~ 8 , а в случае "срезающих" импульсов с параметрами $\alpha_1^* = 0,2$, $\omega_1^* = 5$, $I_{mc}/I_m \cong 0,97$ и $\alpha_1^* = 0,8$, $\omega_1^* = 10$, $I_{mc}/I_m = 1,9$ – соответственно $\sim 4,5$ и $\sim 6,5$ (см. табл. 1 и рис. 5, а).

Кратности амплитуд отрицательных и положительных после "среза" давлений при одной и той же амплитуде "срезающего" импульса возрастают с увеличением его круговой частоты тем сильнее, чем меньше затухание исходного импульса (рис. 5; для кривых принято $t_c^* = t_{mi}^*$, для точек – $t_c^* = t_m^*$).

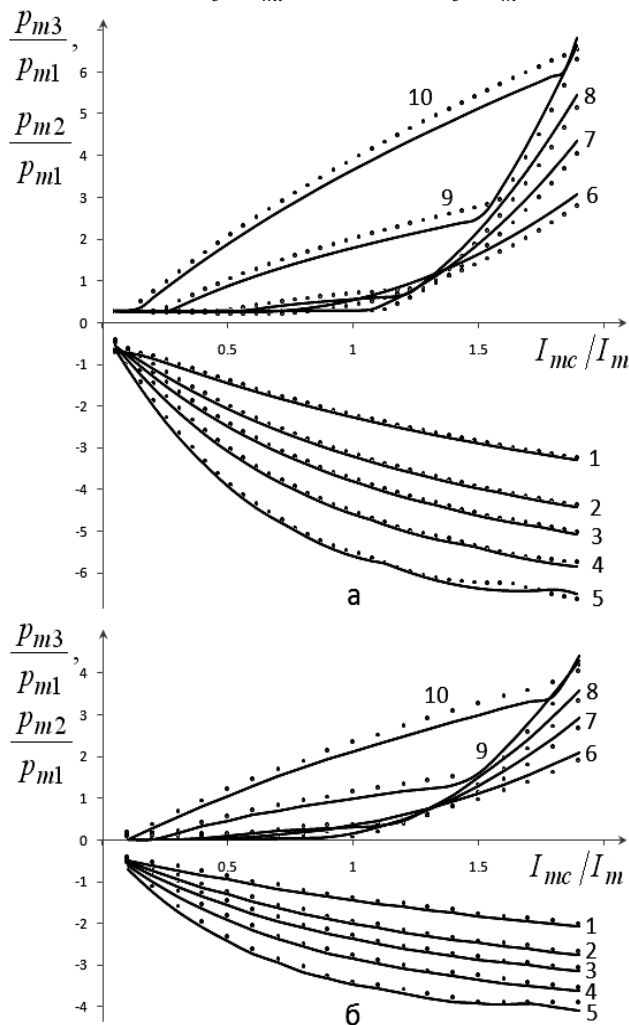


Рис.5. Зависимости кратностей амплитуд отрицательных и положительных давлений после "среза" от круговой частоты и амплитуды "срезающего" импульса при $\tau^* = 0,1$, $\alpha_1^* = 0,8$: а – $\alpha^* = 0,2$; б – $\alpha^* = 0,8$; для кривых 1, 6 – $\omega_1^* = 1$; 2, 7 – 2; 3, 8 – 3; 4, 9 – 4; 5, 10 – 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ "СРЕЗАННОГО" ИМПУЛЬСА

Необходимость ограничения положительных давлений, действующих на оболочку до и после "сре-

за", допустимыми значениями очевидна. Воспользуемся жестко-пластической моделью деформирования [10] и уравнением движения оболочки [11], в соответствии с которыми пластическое сжатие первой, положительной полуволной давления и положительной полуволной давления после "среза" не происходит, если (см. рис. 2)

$$p_{m1} \leq \sigma_s \frac{d}{R}, \quad (16)$$

$$p_{m3} \leq \sigma_s \frac{d'}{R'}, \quad (17)$$

где σ_s – предел текучести материала оболочки; d' и R' – толщина и внутренний радиус оболочки после её расширения отрицательной полуволной давления, $d' < d$, $R' > R$.

Используя условие несжимаемости материала оболочки [10] и пренебрегая в нём величинами порядка $(d/R)^2$, $(d'/R')^2$, имеем

$$\frac{d'}{R'} \cong \frac{d}{R} \left/ \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \right)^2 \right., \quad (18)$$

где ΔR – абсолютная радиальная деформация (увеличение внутреннего радиуса) оболочки после расширения отрицательной полуволной давления.

Из (17) и (18) следует, что для сжатия оболочки после расширения требуется меньшее давление магнитного поля, чем до него, причем тем меньшее, чем больше её относительная деформация $\Delta R/R$ (например, при $\Delta R/R = 0,1$ это уменьшение составляет $\sim 17\%$).

Алгоритм определения параметров "срезанного" импульса для получения заданной радиальной деформации оболочки $\Delta R_{зад}$ силами притяжения к индуктору может состоять из следующих основных блоков.

1. По заданным размерам и электрофизическим характеристикам оболочки, а также параметрам элементов разрядного контура основного накопителя находим параметры исходного импульса ω , α .

2. Рассчитываем $p(t)$ до момента времени $t = t_{m1}$, соответствующего амплитуде p_{m1} , и находим максимально допустимое значение I_0 , при котором выполняется условие (16).

3. Выбираем в первом приближении I_0 и параметры "срезающего" импульса α_1 , ω_1 , I_{01} .

4. Рассчитываем $p(t)$ для $t \geq t_{m1}$, а также радиальную деформацию оболочки в s -том приближении $\Delta R^{(s)}$, $s = 1, 2, \dots$

5. Проверяем выполнение условий

$$|\Delta R^{(s)} - \Delta R_{зад}| < \zeta \quad (19)$$

и (17); в условии (19) ζ – заданная погрешность.

6. Если условия (17), (19) не выполняются, корректируем значение I_0 и параметры "срезающего" импульса.

7. Действия в блоках 4 – 6 повторяем до тех пор, пока условия (19) и (17) не будут выполняться одновременно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Математическая модель, использованная в расчетах, отображает основные особенности возникновения ЭДУ, притягивающих заготовку к внешнему индуктору [1], в частности, изменение направления вихревых токов в заготовке при быстром ослаблении внешнего магнитного поля на стадии "среза" (см. рис. 3, в; 4, в), и поэтому адекватна электромагнитному полю системы.

2. В широком диапазоне значений α^* , определяющих форму исходного импульса тока, ЭДУ, расширяющие цилиндрическую проводящую оболочку при помощи внешнего индуктора, возрастают с увеличением скорости "среза", которое достигается увеличением амплитуды, круговой частоты, а также затухания (при одной и той же амплитуде "среза") колебательно-го "срезающего" импульса (см. рис. 5, табл. 2).

3. Амплитуда "среза" I_c , в зависимости от параметров "срезающего" импульса, может быть меньше, равна или больше амплитуды исходного импульса тока I_m (см. рис. 3, а, 4, а, табл. 2).

Для реальных "срезанных" импульсов внешнего магнитного поля расчетные значения кратности амплитуды отрицательного давления не превосходят предельных значений, полученных в случае "идеального среза" (см. табл. 3).

На стадии "среза" момент времени, в который вторая, отрицательная полуволна импульса давления магнитного поля имеет максимальное значение, приближается к моменту времени, соответствующему отрицательной амплитуде линейной плотности вихревых токов в оболочке (см. рис. 4, в, г).

4. Большие ЭДУ, расширяющие цилиндрическую проводящую оболочку с помощью внешнего индуктора при допустимых ЭДУ, сжимающих её после "среза", могут быть достигнуты в области относительно низких круговых частот "срезающего" импульса, для которых

$$2 \leq \omega_1^* \leq 5. \quad (20)$$

Левая граница (20) обусловлена малой кратностью амплитуды отрицательного давления при $\omega_1^* < 2$, а правая – большой кратностью амплитуды положительного давления после "среза" при $\omega_1^* > 5$ (см. рис. 5).

5. В диапазоне изменения ω_1^* (20) и таких относительных значениях амплитуды "срезающего" импульса I_{mc}/I_m , при которых выполняется условие (17), можно обойтись без дополнительных устройств, предотвращающих колебания тока после "среза", которые могли бы вызывать большие положительные давления (см. рис. 5). С другой стороны, часть импульса после области "среза" не влияет на формирование второй, отрицательной полуволны давления (см. рис. 3, 4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Furth H.P. Devices for metal-forming by magnetic tension. – United States Patent. – №3.196.649. – Cl. 72-56. – 1965.
2. Бондина Н.Н., Коновалов О.Я., Легеза А.В., Макеев В.Г., Михайлов В.М., Шовкоплас А.В. Магнитно-импульсное расширение цилиндрической проводящей оболочки и создание заданного распределения поля с помощью внешнего индуктора // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Частина 5. – С. 84-89.
3. Витков М.Г. Проникновение импульсного магнитного поля внутрь цилиндрического экрана // Журнал технической физики. – 1965. – №3. – С. 410-413.
4. Бондина Н.Н., Крамчанин Е.Г., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Электродинамические усилия, действующие на цилиндрическую оболочку при колебательном разряде магнитно-импульсной установки // Электротехника и электромеханика. – 2007. – №5. – С. 66-70.
5. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.
6. Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Влияние формы импульса внешнего магнитного поля на электродинамические усилия, деформирующие цилиндрическую оболочку // Технічна електродинаміка. – 2007. – №6. – С. 15-19.
7. Борцов А.В., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Физическое моделирование проникновения "срезанных" импульсов магнитного поля в цилиндрическую проводящую оболочку // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Частина 5. – С.90-95.
8. Hansen K.A., Hendrickson I.G. Electromagnetic dent puller. – United States Patent. – №3.998.081. – Cl. 72 – 56. – 1976.
9. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. – Л.: Энергоиздат, 1981. – Т.2. – 416 с.
10. Ильющин А.А., Огибалов П.М. Упруго-пластические деформации полых цилиндров. – М.: издат. МГУ, 1960. – 288 с.
11. Баткилин Я.М., Михайлов В.М. Одномерные задачи импульсного проникновения электромагнитного поля в движущиеся проводники // Изв. вузов. Электромеханика. – 1980. – №12. – С. 1257 – 1262.

Поступила 11.09.2009

Живанков Кирилл Игоревич

физико-технического факультета

Лютенко Лариса Анатольевна

кафедры инженерной электрофизики

Михайлов Валерий Михайлович, д.т.н, проф.

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",

кафедра инженерной электрофизики

тел. (057) 707-60-52

K.I. Zhivankov, L.A. Lyutenko, V.M. Mikhailov

Electrodynamic forces deforming a cylindrical shell under external magnetic field interruption by an oscillating pulse

An effect of external field interruption rate on pulsed magnetic pressure amplitudes that act on a cylindrical conductive shell placed inside a coil is analyzed with similarity criterions. The pulse parameters that make the resistor damping or the coil shorting out unnecessary in Furth circuit are calculated.

Key words – pulsed magnetic pressure, similarity criterions, external field interruption, pulse parameters

НЕОДНОРОДНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ ТРАССЫ: АНАЛИЗ СВОЙСТВ УЧАСТКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Запропоновано метод визначення характеристик окремо кожної з ділянок неоднорідної кабельної траси. Для цього криві відновлюваної напруги всієї траси представляють сумою експоненціальних доданків, кожен з яких пов'язаний з певною ділянкою неоднорідної траси.

Предложено метод определения характеристик по отдельности каждого участка неоднородной кабельной трассы. Для этого кривые восстанавливающегося напряжения трассы представляются суммой экспоненциальных составляющих, каждая из которых связана с соответствующим участком неоднородной трассы.

ВВЕДЕНИЕ

Трассы, состоящие из кабелей разных типов, чаще всего встречаются на энергоблоках АЭС. Повышенные требования к нагревостойкости и пожаробезопасности кабелей гермозоны приводят к тому, что там используют кабели со сшитым полиэтиленом (СПЭ), а вне гермозоны – традиционные кабели с бумажно-масляной изоляцией (БМИ). При обследовании технического состояния кабелей неоднородность кабельной линии либо игнорируется (при испытаниях высоким напряжением или напряжением сверх низкой частоты), либо подразумевается раздельное обследование кабелей разных типов, для чего необходимо выполнить отсоединение кабелей гермозоны от кабельных проходок [1 – 5]. Отсоединение кабелей – трудоемкая процедура, связанная с риском нарушения герметичности концевых муфт. Идеальными были бы такие технические решения, которые позволили бы обойтись без физического разделения составной кабельной трассы на отдельные участки.

Цель работы – разработка метода определения характеристик каждого из участков по отдельности, используя в качестве исходной информации результаты совокупных измерений составной трассы целиком.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Представим неоднородную трассу схемой замещения рис. 1. Каждый из участков трассы содержит емкости быстрых видов поляризации (C_1 , C_2), RC-цепочки замедленных видов поляризации (R_{11} , C_{11} ; R_{21} , C_{21}) и сопротивления утечек (R_1 , R_2). Пусть два участка трассы обследованы по отдельности (ключ на рис. 1 – не замкнут).

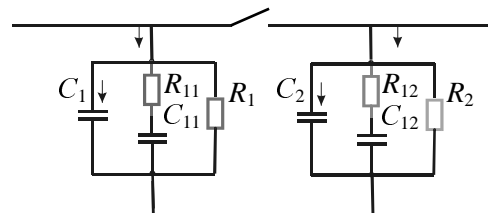


Рис. 1

На рис. 2 приведены кривые восстанавливающегося напряжения отдельно для кабеля с БМИ – верхняя кривая (обозначено POI – Paper Oil Impregnated) и для кабеля со СПЭ – нижняя кривая (обозначено PE – Poly Ethylene). Каждая кривая характеризуется тремя параметрами: амплитуда U_m , момент достиже-

ния максимума t_m , постоянная времени участка само-разряда θ . Кабели с БМИ и со СПЭ сильно отличаются по этим параметрам. Это важная предпосылка для возможностей выделения характеристик участков по отдельности.

Какими будут характеристики трассы после замыкания ключа? Напряжения участков – выравниваются, а заряды распределяются пропорционально емкостям C_1 , C_2 .

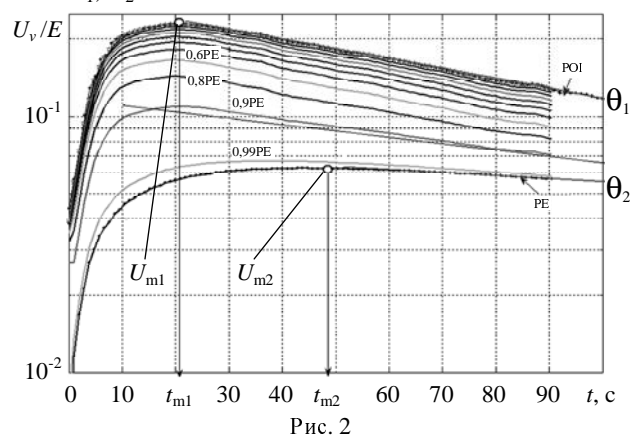


Рис. 2

Пусть до замыкания ключа напряжения участков в какой-то момент времени были равны U_1 и U_2 соответственно. Тогда заряды, накопленные на участках, были равны:

$$Q_1 = U_1 \cdot C_1, \quad Q_2 = U_2 \cdot C_2.$$

Суммарный заряд трассы: $Q = Q_1 + Q_2$.

После замыкания ключа напряжение на составной трассе кабелей станет равным средневзвешенному значению, причем весовые коэффициенты равны долевым содержаниям емкостей участков в суммарной емкости трассы:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1 + \frac{C_2}{C_1 + C_2} U_2.$$

Другими словами, кривая восстанавливающегося напряжения составной трассы занимает промежуточное положение между кривыми каждого из участков по отдельности. На рис. 2 показан ряд таких кривых для случаев, когда доленое содержание участка с СПЭ составляет от 0,99 до 0,1. В первом случае характеристика трассы практически полностью совпадает со СПЭ, а во втором – с БМИ. Очевидно, крайние случаи – вырожденные, когда по результирующей кривой найти параметры участков не удастся.

Если же емкости участков сопоставимы, то на результирующей кривой отражаются свойства каждой из них (средняя часть области между верхней и нижней кривыми рис. 2). Тогда участок саморазряда в полулогарифмическом масштабе имеет *вогнутый* характер. Это означает, что он может быть представлен суммой экспоненциальных составляющих, каждая из которых связана с определенным кабелем.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ УЧАСТКА САМОРАЗРЯДА

На рис. 3 показана кривая восстанавливающегося напряжения составной трассы, состоящей из кабеля с БМИ (типа ААШВ-3х185-6 кВ) и со СПЭ (Gammalion 240 – 6 кВ). Участок саморазряда кривой имеет вогнутый характер, поэтому может быть представлен суммой двух экспоненциальных составляющих:

$$\frac{U_v}{E} = a_1 \cdot e^{-t/\theta_1} + a_2 \cdot e^{-t/\theta_2},$$

где θ_1, θ_2 – постоянные времени экспоненциальных составляющих; a_1, a_2 – начальные значения экспоненциальных составляющих.

Выделим "медленную" составляющую – кривая 2, рис. 3. Ее постоянная времени $\theta_2 = R_2 \cdot C_2 = 2200$ с. Очевидно, она относится к кабелю со СПЭ.

Удаляя "медленную" составляющую из кривой восстанавливающегося напряжения, получим кривую 3, содержащую "быструю" экспоненту 4. Ее постоянная времени – $\theta_1 = R_1 \cdot C_1 = 200$ с. Она относится к кабелю с БМИ.

Таким образом, найдены два важных параметра θ_1, θ_2 изоляции участков трассы, не зависящие от длин участков и толщины изоляции.

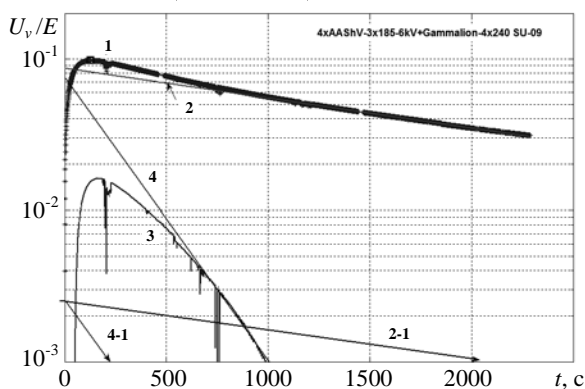


Рис. 3

НАХОЖДЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЦЕПОЧЕК УЧАСТКОВ ТРАССЫ И КРИВЫХ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Длины участков трассы и погонные емкости кабелей считаем известными. Тогда емкости участков C_1 и C_2 также известны, а значит известны и сопротивления утечек R_1 и R_2 (по найденным выше постоянным времени θ_1 и θ_2). Для нахождения кривых восстанавливающегося напряжения участков требуется найти еще 4 параметра релаксационных цепочек $R_{11}, C_{11}; R_{21}, C_{21}$ (рис. 1). Представим их в виде постоянных времени $\theta_{11} = R_{11} \cdot C_{11}; \theta_{21} = R_{21} \cdot C_{21}$ и долевых со-

держаний $\eta_{11} = C_{11}/C_1; \eta_{21} = C_{21}/C_2$ релаксационных емкостей. Обычно долевые содержания релаксационных емкостей не превышают 5 – 20% от емкостей быстрых видов поляризации. Это следует из того, что именно на столько возрастают емкости при уменьшении частоты до нуля. Постоянные времени релаксационных цепочек того же порядка, что и моменты максимумов кривых восстанавливающегося напряжения: 20 – 100 с – для БМИ; 100 – 1000 с – для СПЭ.

Используя в качестве ориентира указанные диапазоны изменения переменных, выполним ряд последовательных приближений, сравнивая расчетные кривые восстанавливающегося напряжения с экспериментальной. Результаты приближений приведены в таблице и на рис. 4 (построенном в двойном логарифмическом масштабе для более удобного сравнения расчетных кривых с экспериментальной).

Первое приближение (кривая 1, рис. 4) оказалась, как видим, весьма далекой от экспериментальной кривой как по амплитуде U_m/E , так и по моменту максимума t_m . Поэтому выполняем приближения 2 и 3, увеличивая долю η_{11} "медленного" релаксатора. Наблюдаем рост амплитуды восстанавливающегося напряжения и незначительное уменьшение t_m .

На четвертом шаге приближения уменьшили постоянную времени θ_{11} в 2 раза. Получили существенный рост U_m/E и уменьшение t_m . Дальнейшее уменьшение θ_{11} в 2 раза (на 5-м шаге) привело к завышенному значению U_m/E по сравнению с экспериментальной кривой, и момент максимума t_m все равно остался завышенным.

Таблица

Параметры схемы замещения составной линии, соответствующие кривым восстанавливающегося напряжения рис. 4.

Номер приближения	$\eta_{11} = C_{11}/C_1$	$\theta_{11} = R_{11} \cdot C_{11}$	$\eta_{21} = C_{21}/C_2$	$\theta_{21} = R_{21} \cdot C_{21}$	U_m/E	t_m, c
1	≈0,07	≈200	0,09	2000	0,0131	478,8
2	0,07*2	200	"-	"-	0,0246	458,4
3	0,07*2*2	200	"-	"-	0,0448	433,4
4	0,07*2*2	100	"-	"-	0,0842	263,8
5	0,07*2*2	50	"-	"-	0,1352	156,9
6	0,07*2	50	"-	"-	0,0750	167,3
7	0,07*2	25	"-	"-	0,0975	98

Поэтому на 6-м шаге уменьшили параметр η_{11} в 2 раза, получили снижение ниже экспериментального уровня параметра U_m/E при некотором увеличении t_m .

Наконец, на 7-м шаге уменьшили в 2 раза параметр θ_{11} . Получили результат, удовлетворительно совпадающий с экспериментом.

Как видим, варьировать пришлось два параметра "быстрой" экспоненты. Начальные приближения для остальных параметров модели оказались удовлетворительными.

Надо заметить, что задача восстановления параметров модели по экспериментальным данным является *плохо обусловленной*. Близкие кривые восстанавливающегося напряжения можно получить при существенно различных параметрах модели. Из представленного примера можно предположить, что параметры "медленных" экспонент должны восстанавливаться точнее, чем "быстрых".

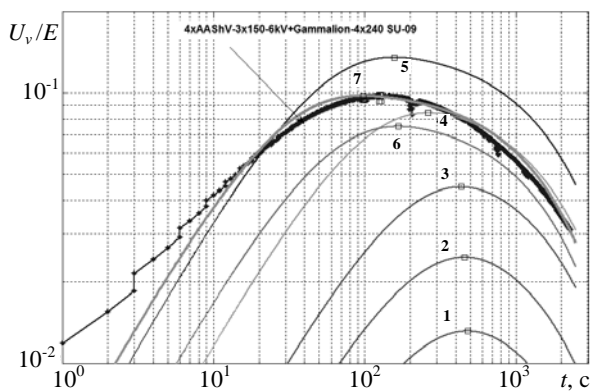


Рис. 4

После нахождения параметров схемы замещения строим кривые восстанавливающегося напряжения для каждого из участков трассы по отдельности – рис. 5: 1 – исходная кривая; 2 – результат приближения к ней с помощью построения схемы замещения; 3 – кривая восстанавливающегося напряжения участка с БМИ; 4 – то же для участка со СПЭ.

Параметры кривых восстанавливающегося напряжения:

а) для кабеля ААШВ: $U_m/E = 0,085$; $t_m = 55$ с;

б) для кабеля Gammalion: $U_m/E = 0,0048$; $t_m = 950$ с.

По параметрам восстанавливающегося напряжения оба участка трассы кабеля находятся в удовлетворительном техническом состоянии.

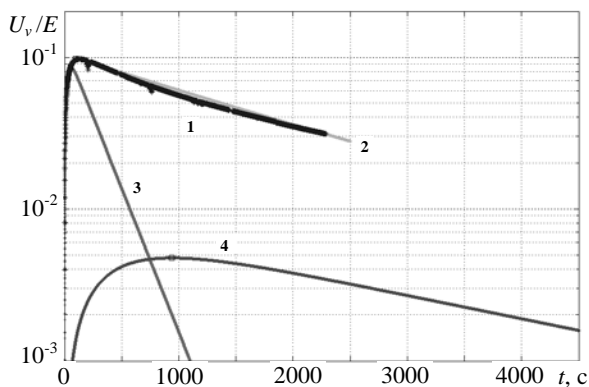


Рис. 5

ВЫВОДЫ

1. Выделение из кривой восстанавливающегося напряжения составной трассы характеристик отдельных участков возможно, если участок саморазряда кривой имеет вогнутый характер в полулогарифмическом масштабе, подобный рис.3.

2. На первом этапе находят экспоненциальные составляющие участка саморазряда.

3. На втором этапе находят 4 параметра релаксационных цепочек, ориентируясь на приведенные выше ограничения.

4. На третьем этапе, когда все параметры схемы замещения рис. 1 найдены, рассчитываются кривые восстанавливающегося напряжения каждого из участков по отдельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение по определению технического состояния и управлению старением кабелей АС. – М.: РОСЭНЕРГОАТОМ. – 2002. – 102 с.
2. Мониторинг технического состояния и оценка остаточного срока службы силовых кабелей среднего и низкого напряжения с полиэтиленовой изоляцией. – М.: РОСЭНЕРГОАТОМ. – 2000. – 24 с.
3. Методические указания по определению технического состояния и остаточного срока службы кабелей систем безопасности, контроля и измерений на атомных станциях. – Лыткарино: НИИП МинатомРФ. – 1998 г. – 35 с.
4. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Методика оценки технического состояния кабелей по параметрам межфазного пространства // Электрическая изоляция – 2006: четвертая междунар. науч. – техн. конф. , 16-19 мая 2006 г.: Труды конференции. – СПб., 2006. – С. 190 - 192.
5. Беспрозванных А.В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений // Технічна електродинаміка. – № 3. – 2008. – С. 30 – 37.
6. Система диагностики CD-31. Инструкция по эксплуатации: Hagenuk KMT. Kabelmesstechnik GmbH, 2000. – 87 pp.

Поступила 24.09.2009

Набока Борис Григорьевич, д.т.н., проф.,
Беспрозванных Анна Викторовна, к.т.н., доц.,
Москвитин Евгений Сергеевич
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул.Фрунзе,21,
кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"
тел. (057) 70-10-60, e-mail: naboka@kpi.kharkov.ua,
bezprozvannych@kpi.kharkov.ua

B.G. Naboka, A.V. Bezprozvannych, E.S. Mosevitch

Non-uniform cable lines: section properties analysis through recovery voltage measurement results

A method of characteristics determination separately of each section of a non-uniform cable line is introduced. For this purpose, the line recovery voltage curves are represented by a sum of exponential components each of which is determined by a certain site of the non-uniform line.

Key words – non-uniform cable line, paper oil impregnated insulation, polyethylene, equivalent circuit, recovery voltage, exponential components

МОДИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ПЕРЕВОДЕ ИХ В НОВЫЙ РЕЖИМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

У статті запропоновано метод модифікації параметрів багатоконтурних випробувальних пристроїв при їхньому переведенні в новий режим експлуатації. Показано застосування методу для випробувальних пристроїв з активною індуктивною навантаженням.

В статье предложен метод модификации параметров многоконтурных испытательных устройств при их переводе в новый режим эксплуатации. Показана применимость метода для испытательных устройств с активной индуктивной нагрузкой.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. В настоящее время испытания технических средств на устойчивость к дестабилизирующим электромагнитным факторам осуществляются с использованием широкой номенклатуры импульсных воздействий, конкретное применение которых определяется видом и назначением испытываемых объектов.

Такого рода испытания проводятся в испытательных лабораториях и центрах, оснащенных специальным оборудованием – высоковольтными импульсными испытательными устройствами (ВИИУ).

Форма испытательных воздействий, формируемых ВИИУ, в общем случае зависит как от параметров ВИИУ, так и от параметров нагрузки (испытываемого объекта). Наличие широкого диапазона изменения параметров испытываемых объектов объективно приводит к необходимости корректировки в процессе эксплуатации параметров разрядной цепи существующих ВИИУ для удовлетворения требований к формируемому импульсному воздействию.

Анализ публикаций. Большинство ВИИУ, формирующих импульсы тока (магнитного поля) мили- и микросекундного диапазона конструктивно представляет собой несколько емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), которые параллельно разряжаются на нагрузку [1 – 3]. Эквивалентная схема таких испытательных устройств показана на рис. 1.

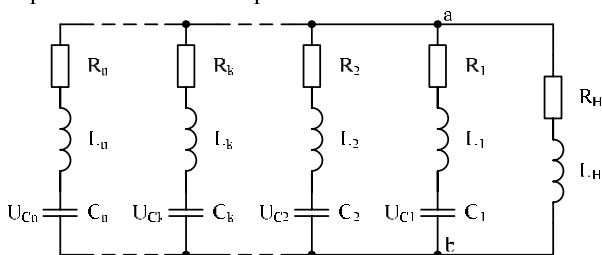


Рис. 1. Эквивалентная схема испытательного устройства

Обычно испытательные импульсы тока, формируемые в таких устройствах, задаются набором контролируемых амплитудно-временных параметров (АПВ) либо аналитическим выражением [4, 5]. Характерные формируемые импульсы тока и их АВП показаны на рис. 2 [4].

Выбор параметров разрядной цепи при проектировании новых ВИИУ рассмотрен в ряде работ, например [6 – 8].

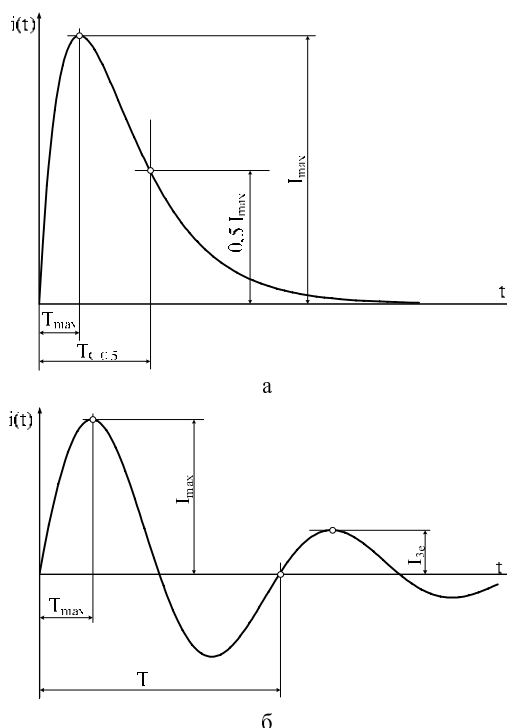


Рис. 2. Типовые формы испытательных импульсов тока и их АВП

Однако в практике проведения испытаний имеет место также задача перевода существующих ВИИУ в режим эксплуатации с новой нагрузкой и / или новой формой импульса тока [7, 9]. Корректировка параметров одноконтурных ВИИУ при его переводе в новый режим эксплуатации рассмотрена в ряде работ, например [9, 10], но решение задачи корректировки при использовании нескольких ЕНЭ не нашло должного отражения в литературе.

Целью настоящей работы является разработка метода определения параметров разрядной цепи существующих многоконтурных ВИИУ при изменении режима их эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используя теорию подобия [11], можно показать, что для параллельной работы n ЕНЭ на активно-индуктивную нагрузку имеют место следующие соотношения для масштабных коэффициентов при формировании геометрически подобных импульсов тока:

$$m_L = m_R \cdot m_t \quad (1)$$

$$m_U = m_R \cdot m_I \quad (2)$$

$$m_t = m_R \cdot m_C \quad (3)$$

$$m_J = m_I^2 \cdot m_t \quad (4)$$

$$m_Q = m_I \cdot m_t, \quad (5)$$

где $m_R, m_L, m_C, m_t, m_U, m_I, m_J, m_Q$ – соответственно масштабные коэффициенты активного сопротивления, индуктивности, емкости, времени, зарядно-го напряжения, тока, интеграла действия и заряда.

Данные соотношения могут быть использованы для решения ряда задач модификации параметров ВИИУ.

Рассмотрим задачу перевода ВИИУ в режим эксплуатации с новой нагрузкой.

Задача 1. Пусть имеется ВИИУ, с помощью которого в нагрузке с параметрами R_H, L_H формируется импульс тока с некоторыми АВП. Требуется в новой нагрузке с параметрами R_H^*, L_H^* сформировать импульс тока с теми же АВП, что и в исходном режиме эксплуатации. Постановка задачи в таком виде дает основание принять $m_t = 1$ и $m_I = 1$, что позволяет сохранить АВП. Тогда, после подстановки m_t и m_I в (1) – (5), соотношение между остальными масштабными коэффициентами принимает следующий вид:

$$\begin{cases} m_L = m_R = m_U; \\ m_C \cdot m_U = 1; m_J = m_Q = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Изменение нагрузки характеризуется двумя величинами:

– коэффициентом изменения величины активного сопротивления нагрузки

$$m_R = \frac{R_H^*}{R_H} \quad (7)$$

– коэффициентом изменения величины индуктивности нагрузки

$$m_L = \frac{L_H^*}{L_H}. \quad (8)$$

Анализ первого уравнения системы (6) показывает, что изменение зарядных напряжений ЕНЭ должно производиться в соответствии с большим значением одной из двух величин, определяемых по (7) и (8)

$$m^* = \text{MAX}(m_R^*, m_L^*), \quad (9)$$

где m^* – коэффициент изменения нагрузки; $\text{MAX}()$ – функция, возвращающая большее значение из аргументов.

Тогда система (6) преобразуется к виду

$$\begin{cases} m_L = m_R = m_U = m^*; \\ m_C = \frac{1}{m^*}; m_J = m_Q = 1. \end{cases} \quad (10)$$

Если коэффициент изменения величины активного сопротивления нагрузки больше коэффициента изменения величины индуктивности $m^* = m_R^* > m_L^*$, то в ветвь нагрузки (между точками а и b в схеме, по-

казанной на рис. 1) должна быть введена дополнительная индуктивность (см. рис. 3а), величина которой равна

$$L_D = m^* \cdot L_H - L_H^* = m_R^* \cdot L_H - L_H^*. \quad (11)$$

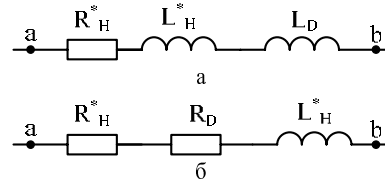


Рис. 3. Схемы корректировок нагрузки

Если коэффициент изменения величины активного сопротивления нагрузки меньше коэффициента изменения величины индуктивности $m^* = m_L^* > m_R^*$, то в ветвь нагрузки должно быть введено дополнительное сопротивление (см. рис. 3б), величина которого определяется по соотношению

$$R_D = m^* \cdot R_H - R_H^* = m_L^* \cdot R_H - R_H^*. \quad (12)$$

Соответственно при выполнении условия $m_L^* = m_R^*$ введение дополнительных элементов в ветвь нагрузки не требуется.

Таким образом, если имеется действующее ВИИУ, которое в нагрузке с параметрами R_H, L_H формирует импульс тока с некоторым набором АВП, то при переходе в режим эксплуатации с нагрузкой, имеющей параметры R_H^* и L_H^* , необходимо:

1. Определить вид и величину дополнительных элементов и ввести их в ветвь нагрузки в соответствии с (11) или (12);

2. Изменить в соответствии с (10) величины параметров элементов ЕНЭ следующим образом:

$$R_k^* = m^* \cdot R_k; \quad (13)$$

$$L_k^* = m^* \cdot L_k; \quad (14)$$

$$U_{Ck}^* = m^* \cdot U_{Ck}; \quad (15)$$

$$C_k^* = \frac{C_k}{m^*}, \quad (16)$$

где $k = 1 \dots n$ – номер ЕНЭ.

При этом АВП импульса тока, формируемого в нагрузке, остаются прежними.

Рассмотрим задачу перевода ВИИУ в режим формирования нового импульса тока.

Задача 2. Пусть в нагрузке R_H, L_H формируется импульс тока с характерным значением тока I и характерным временем T (например, как показано на рис. 2, максимальным значением тока и временем его достижения; амплитудой второй полуволны и периодом колебаний и т.п.).

Требуется сформировать в этой нагрузке геометрически подобный по форме импульс тока, который отличается от исходного величинами характерного времени T^* и характерного значения тока I^* .

Тогда коэффициент изменения характерного времени определится как

$$m_t^* = \frac{T^*}{T}, \quad (17)$$

а коэффициент изменения характерного значения тока

$$m_I^* = \frac{I^*}{I}. \quad (18)$$

Подставив m_t^* и m_I^* в (1) – (5) в качестве соответствующих масштабных коэффициентов, имеем:

$$\begin{cases} m_L = m_R \cdot m_C = m_t^*; & m_U = m_R \cdot m_I^*; \\ m_R = m_I^{*2} \cdot m_t^*; & m_Q = m_I^* \cdot m_t^*. \end{cases} \quad (19)$$

В силу того, что активное сопротивление и индуктивность ветви нагрузки не могут быть уменьшены, должны выполняться следующие условия:

$$m_R \geq 1, \quad m_L \geq 1. \quad (20)$$

Положим, что $m_t^* \geq 1$, тогда из первого уравнения системы (19) с учетом (20) имеем:

$$m_L \geq m_R \geq 1, \quad (21)$$

соответственно для варианта $m_t^* < 1$

$$m_R > m_L \geq 1. \quad (22)$$

С точки зрения минимизации запасаемой в ВИИУ энергии, целесообразно для варианта $m_t^* \geq 1$ принять $m_R = 1$, а для $m_t^* < 1$ – $m_L = 1$. Тогда коэффициенты изменения параметров ЕНЭ, а также величины дополнительных элементов в ветви нагрузки могут быть определены по соотношениям, приведенным в табл. 1.

Если в качестве подобных величин выступают характерное время T и интеграл действия J (или заряд Q), то предварительно находим коэффициент изменения характерных значений тока, используя (4) (или

$$(5)) \quad m_I^* = \left(\frac{m_J^*}{m_t^*} \right)^{0,5} \quad (\text{или } m_I^* = \frac{m_Q^*}{m_t^*}) \quad \text{и решают далее}$$

задачу 2.

Таблица 1

$m_t^* \geq 1$	$m_t^* < 1$
$m_R^* = 1$	$m_R^* = \frac{1}{m_t^*}$
$m_L^* = m_t^*$	$m_L^* = 1$
$m_C^* = m_t^*$	$m_C^* = m_t^{*2}$
$m_U^* = m_t^*$	$m_U^* = \frac{m_I^*}{m_t^*}$
$L_D = (m_L^* - 1) \cdot L_H$	$R_D = (m_R^* - 1) \cdot R_H$

Таким образом, если имеется действующее ВИИУ, которое в нагрузке с параметрами R_H , L_H формирует импульс тока с некоторым набором АВП – T и I , то при переходе в режим эксплуатации с другим набором АВП – T^* и I^* , необходимо:

1. Определить вид и величину дополнительных элементов и ввести их в ветвь нагрузки в соответствии с данными табл. 1;

2. Изменить в соответствии с (19) величины параметров элементов ЕНЭ следующим образом:

$$\begin{cases} R_k^* = m_R^* \cdot R_k; & L_k^* = m_L^* \cdot L_k; \\ U_{Ck}^* = m_U^* \cdot U_{Ck}; & C_k^* = m_C^* \cdot C_k, \end{cases} \quad (23)$$

где $k = 1 \dots n$ – номер ЕНЭ.

Можно показать, что, на основании геометрического подобия импульсов тока, после выполнения такой процедуры сохраняются отношения характерных параметров импульса тока и их разностей, например:

$$\frac{T_1^*}{T_2^*} = \frac{T_1}{T_2}; \quad \frac{T_1^* - T_2^*}{T_3^* - T_4^*} = \frac{T_1 - T_2}{T_3 - T_4}; \quad (24)$$

$$\frac{I_1^*}{I_2^*} = \frac{I_1}{I_2}; \quad \frac{I_1^* - I_2^*}{I_3^* - I_4^*} = \frac{I_1 - I_2}{I_3 - I_4}. \quad (25)$$

Рассмотрим задачу перевода ВИИУ в режим эксплуатации с новой нагрузкой и формой импульса.

Задача 3. Пусть в нагрузке R_H , L_H формируется импульс тока с характерным значением тока I и характерным временем T .

Требуется сформировать в новой нагрузке с параметрами R_H^* , L_H^* геометрически подобный по форме импульс тока, который отличается от исходного величинами характерного времени T^* и характерного значения тока I^* .

Решение поставленной задачи решается путем последовательного решения двух, ранее рассмотренных задач:

- изменить нагрузку при сохранении АВП импульса тока;
- изменить АВП импульса тока, сохранив полученные значения нагрузки.

Отметим особенность решения второй задачи – в качестве нагрузки следует принять все элементы ветви нагрузки, полученные из решения первой задачи.

Применение полученных решений покажем на следующем примере.

В исходном режиме генератор А-компоненты тока искусственной молнии [3], выполненный по схеме, приведенной на рис. 1 и имеющий два ЕНЭ с параметрами $R_1 = 0,076$ Ом; $L_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ Гн; $C_1 = 228 \cdot 10^{-6}$ Ф; $U_{C1} = 35 \cdot 10^3$ В; $R_2 = 0,18$ Ом; $L_2 = 1,5 \cdot 10^{-6}$ Гн; $C_2 = 108 \cdot 10^{-6}$ Ф; $U_{C2} = 35 \cdot 10^3$ В работает на RL – нагрузку с параметрами $R_H = 0,05$ Ом; $L_H = 1 \cdot 10^{-6}$ Гн. Формируемый импульс тока имеет следующий АВП: $I_{\max} = 2,05 \cdot 10^5$ А; $t_{\max} = 2,9 \cdot 10^{-5}$ с.

Требуется, используя действующую установку, в новой нагрузке с параметрами $R_H = 0,1$ Ом; $L_H = 3 \cdot 10^{-6}$ Гн сформировать импульс тока с следующими АВП: $I_{\max} = 5 \cdot 10^4$ А; $t_{\max} = 2 \cdot 10^{-5}$ с.

Производя последовательно решение рассмотренных в статье задач с заданными исходными данными, приходим к необходимости следующей модификации параметров ЕНЭ: $R_1 = 0,331$ Ом; $L_1 = 6 \cdot 10^{-6}$ Гн; $C_1 = 0,361 \cdot 10^{-6}$ Ф; $U_{C1} = 37,1 \cdot 10^3$ В; $R_2 = 0,783$ Ом; $L_2 = 4,5 \cdot 10^{-6}$ Гн; $C_2 = 0,171 \cdot 10^{-6}$ Ф;

$U_{C2} = 37,1 \cdot 10^3$ В. При этом требуется в цепь нагрузки ввести дополнительный резистор $R_D = 0,118$ Ом.

Учитывая, что максимальное напряжение зарядки ЕНЭ равно 50 кВ [3], предлагаемая модификация параметров ЕНЭ может быть осуществлена отключением части накопительных конденсаторов и введением, при необходимости, в цепи их разрядки дополнительных резисторов и катушек индуктивности.

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод модификации параметров многоконтурных испытательных устройств при их переводе в новый режим эксплуатации.

2. Получены соотношения для определения величины дополнительных элементов, вводимых в цепь RL -нагрузки для сохранения контролируемых амплитудно-временных параметров импульса тока.

Материалы статьи могут быть использованы для разработки методов модификации испытательных устройств других типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплекс высоковольтного испытательного электрофизического оборудования экспериментальной базы НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" / М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, А.К. Колобовский, В.И. Кравченко // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ "ХПИ". - №4. – 2004. – С. 3 – 13.
2. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования / М.И. Баранов, В.А. Бочаров, Н.Н. Игнатенко, А.К. Колобовский // Электротехника і електромеханіка. – 2003. – №2. – С. 75 – 80.
3. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов / М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, В.И. Кравченко [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2008. - №3. – С. 81 – 85.
4. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник / В.И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
5. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.

6. Губарев Г.Г. Трехкритериальная оптимизация импульсных источников питания / Г.Г. Губарев, В.В. Конотоп // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. - №6. – С. 66 – 73.
7. Петков А.А. Разряд двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку / А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПИ". – №34. – 2007. – С. 79 – 85.
8. Фридман Б.Э. Формирование импульса тока при программируемом разряде емкостного накопителя энергии / Б.Э. Фридман // Электричество. – 1999. – №6. – С. 42 – 48.
9. Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку / А.А. Петков // Электротехника. – 1990. – №10. – С. 35 – 36.
10. Кравченко В.И. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии / В.И. Кравченко, А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 70–75.
11. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) / В.А. Веников, Г.В. Веников. – М.: Высш. школа, 1984. – 439 с.

Поступила 01.07.2009

Петков Александр Александрович, к.т.н., с.н.с.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко 47, НИПКИ "Молния" тел./факс (057) 707-62-80, E-mail: alexp@kpi.kharkov.ua

A.A. Petkov

Test devices parameters modification of under their switching to a new operation mode.

In the article, a parameter modification method for multiloop test devices under their switching to a new operation mode is introduced. The method applicability for test devices with an active-reactive load is shown.

Key words – multiloop test device, active-reactive load, operation mode switching, parameters modification

М.В. Загірняк, В.М. Усатюк

ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ У СВІТЛІ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗОВНІШНЬОГО НЕЗАЛЕЖНОГО ОЦІНЮВАННЯ

В статті розглянуто реальний стан якості математичної підготовки в системі загальної середньої освіти в Україні на основі аналізу офіційних результатів зовнішнього незалежного оцінювання (ЗНО) якості освіти 2009 року з математики у світлі порівняння результатів критеріальної системи оцінювання та результатів рейтингового шкалювання на базі еквіпроцентилів. Позначені проблеми вищої школи у галузі інженерної та природничої підготовки, які є наслідками такої ситуації.

В статье рассмотрено реальное состояние качества математической подготовки в системе общего среднего образования в Украине на основании анализа официальных результатов внешнего независимого оценивания качества образования 2009 года по математике в свете сравнения результатов критериальной системы оценивания и результатов системы рейтингового шкалирования на базе эквипроцентилев. Обозначены проблемы высшей школы в области инженерной и естественнонаучной подготовки, вытекающие из такой ситуации.

Почати потрібно з того, що мабуть ніхто з поважних читачів не буде заперечувати тези про те, що освічена нація є запорукою сильної, спроможної країни, а освіченість (якщо хочете навченість) молодого покоління забезпечує країні її майбутнє. І нам, як педагогам та вченим з багаторічним досвідом роботи з молоддю, відверто можна казати про те, що рівень знань та навичок випускників системи загальної середньої освіти багато років поспіль знижується і зараз уже наблизився до крайньої межі. При цьому мова йде про освіту в країні в цілому, а не про поодинокі приклади перемог наших школярів на міжнародному рівні. Говорити не тільки про власний досвід, а про всю країну дає можливість зовнішнє незалежне оцінювання (ЗНО) якості освіти, за результатами якого можливо отримати зріз знань більшості випускників системи повної загальної середньої освіти, при тому з тих предметів, з яких вони вважають себе навченими і визначаються відповідним чином зі своїм майбутнім фахом, для якого ці предмети є профільними. Одразу необхідно зазначити, що автори статті не є противниками зовнішнього незалежного оцінювання, хоча теза про нього як основний інструмент боротьби та перемоги корупції потребує окремої великої дискусії. Повернемося до питання якості освіти і до невід'ємної складової визначення цієї якості, системи оцінювання навчальних досягнень учасників зовнішнього тестування. Оцінювання з кожного предмета, як відомо, відбувається за двома окремими шкалами: за 12-бальною критеріальною шкалою, для врахування результатів ЗНО при державній підсумковій атестації системи загальної середньої освіти і за 100-бальною рейтинговою шкалою від ста до двохсот балів для участі в конкурсі при вступі до вишів країни. Обидві шкали оцінювання визначаються у нормативних документах Українського центру оцінювання якості освіти (УЦОЯО) як справедливі, виважені, складені на основі методів критеріальних педагогічних вимірювань. Що ж є насправді та до чого призводить використання таких підходів?

Ретельно розглянемо 100-бальну рейтингову шкалу на прикладі обробки результатів ЗНО

поточного року з математики. Результати тестування можна вважати цілком достовірними (тобто такими, що адекватно відображують рівень підготовки), зважаючи на репрезентативність вибірки – кількість учасників, зареєстрованих на тестування з математики – 259213, з яких 90,85 % узяли в ньому участь. Ця кількість поступається лише кількості учасників тестування з обов'язкового предмета «Українська мова та література» – 461981 (93,93 %) [1].

Так, тест з математики оцінювався максимально у 54 абсолютні (або так звані «сирі») тестові бали і зрозуміло, що відображення результату за 100-бальною шкалою від ста до двохсот балів потребувало масштабування. Питання полягає саме в тому, як це масштабування виконати. Звернемося до обґрунтування 100-бальної шкали, викладеного у «Порядку визначення результатів зовнішнього незалежного оцінювання випускників загальноосвітніх навчальних закладів» [2]:

- є наближеною до еталонної шкали із середнім значенням результатів з кожного предмета;
- є стандартизованою, розподіл учасників за цією шкалою є приблизно однаковим незалежно від предмета тестування;
- є рейтинговою, учасник тестування, який набрав з даного предмета більше тестових балів, матиме за цією шкалою оцінку не нижчу, ніж той, хто набрав з даного предмета меншу кількість балів;
- є справедливою, учасники тестування, які набрали однакову кількість тестових балів з даного предмета, матимуть за цією шкалою однакові оцінки;
- забезпечує більшу розподільну здатність тих оцінок, які мають значення, що близькі до кінців інтервалу (100 і 200 балів).

Перші два чинники взагалі зайві з точки зору оцінювання якості знань, а що стосується решти, то будь-кому ледь знайомому з математикою зрозуміло, що цим критеріям відповідає будь-яке пропорційне масштабування. І на думку одразу ж спадає найпростіше та найсправедливіше – перенести початок відліку з нуля в сто балів та лінійно розтягнути діапазон оцінювання так, щоб максимальні бали двох шкал збігалися (для математики ЗНО2009 – 54 та 200) (рис. 1, діагональна лінія).

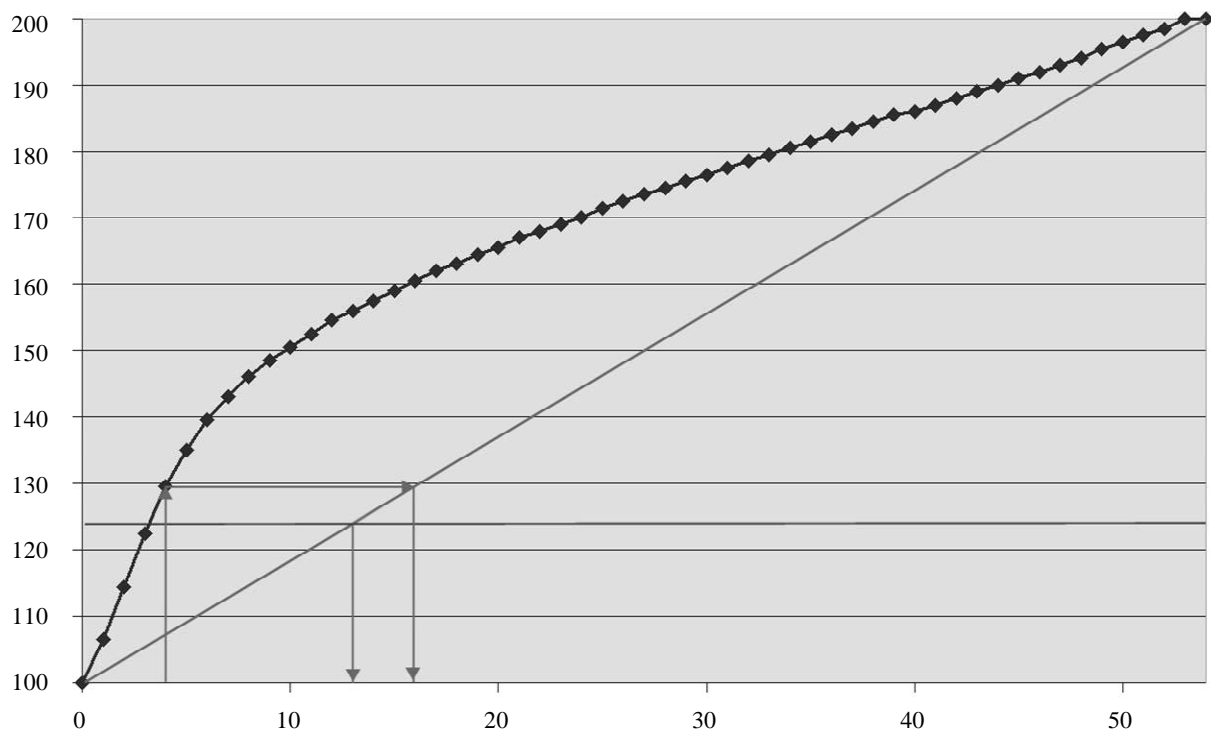


Рис.1. Масштабування результатів з математики ЗНО2009

При цьому отримана шкала повністю відповідає всім задекларованим критеріям та не спотворено відображає абсолютні досягнення учасників ЗНО з математики. Ця шкала може бути побудована вже на етапі складання тестів після визначення максимальної кількості балів за тест і дозволяє свідомо визначити межу знань тих, хто спроможний отримувати вищу освіту. Замість цього використовується масштабування шкал на базі еквіпроцентилів. Завдяки якому «ненормальні» результати (такі, що не описуються нормальним законом розподілу ймовірності) нормалізуються відносно середини шкали (150 балів) з відхиленням 20 балів. Таким чином, цілком штучно те, що ми маємо, перетворюється на те, що ми мали би мати, при нормальній ситуації в загальній освіті. Нормальний закон розподілу називається «нормальним» саме тому, що він відповідає саме результатам нормального збалансованого процесу у будь-якій галузі науки, техніки, виробництва, діяльності суспільства. При цій, на перший погляд, чисто математичній операції масштабування відбувається підміна оцінювання наявності знань та їх рівня рейтинговим відображенням рівня цих знань для конкретного учасника тестування відносно рівня знань решти учасників. Таким чином, шкала будується на етапі перевірки шляхом обробки всього масиву результатів складання тестів і дає можливість штучно поліпшити загальні результати тестування за наявних знань і ввести в оману суспільство щодо реального стану справ у загальній середній освіті, яку держава, до речі, повинна обов'язково забезпечувати відповідно до Конституції. Поглянемо, як це виглядає на прикладі обробки результатів з математики ЗНО2009. Офіційну таблицю переведення тестових балів у рейтингову шкалу [3] наведено у графічному вигляді (графік

з позначками) на рисунку 1. Одразу звернемо увагу на те, що мінімальним балом на шкалі, з яким можна подавати сертифікат для участі в конкурсі при вступі до вишу (межа 124 бали), є сто двадцять дев'ять з половиною і на те, що цьому рейтинговому балу відповідають лише чотири «сірі» тестові бали. Для того, щоб набрати таку саму кількість балів при лінійному масштабуванні, необхідно мінімум у чотири рази більше тестових балів, або хоча б мінімум 13 тестових балів для подолання межі у бажані 124 бали. Таким чином, заради покращення загальної картини за розв'язання одного завдання з вибором одного варіанта з наданих відповідей (простіший тип завдання при тестуванні) дається на початку шкали до восьми рейтингових балів. Що за умов прийому до вишів наступного року, коли до суми цих рейтингових балів з трьох предметів (у середньому 450 балів) додаватиметься ще й середній бал атестата (максимум 12 балів) – ці вісім балів за одне просте питання якраз відповідатимуть напруженій сумлінній праці учня протягом 11 років.

Таким чином, різниця між цими лініями відображає ступінь штучного поліпшення результатів для кожної «якісної» категорії учасників тестування.

А якщо ми ще згадаємо про зміст тесту з математики, який включав завдання на матеріалі з 5-го до 11-го класів, і, за даними психометричного аналізу самого УЦОЯО, був нескладним, то бажані чотири тестові «сірі» бали можна взагалі було набрати, не володіючи всією програмою 5-го класу. Проте більше ніж двадцять дві з половиною тисячі учасників не впорались навіть з цим.

Звернемося до розподілу учасників незалежного тестування з математики за набраними тестовими балами (рис. 2).

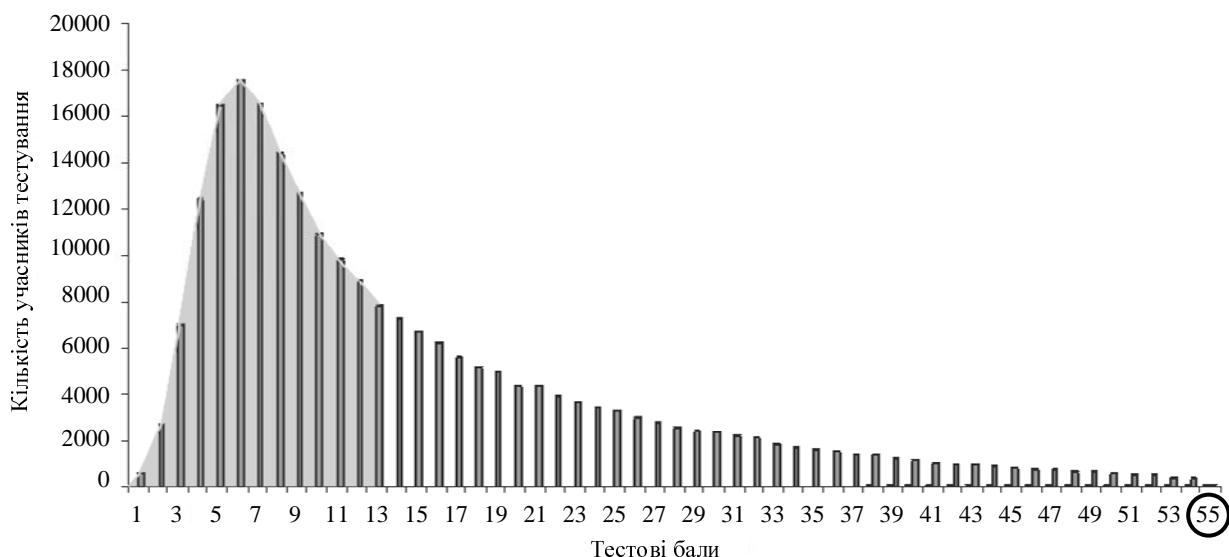


Рис.2. Розподіл учасників тестування з математики за набраними тестовими балами

Бачимо, по-перше, що чомусь в офіційних результатах присутні ті, хто набрав 55 балів з 54 можливих [1]. А по-друге, що «найпопулярнішими» балами були 5–6–7. А якщо подивитись на межу 13 тестових балів, яка насправді відповідає 124 балам, то більше шістдесят відсотків учасників тестування з математики не мали б можливості скористатися своїми результатами при вступі, і тоді суспільство вимушене було б реагувати на стан справ у загальній середній освіті. А так за допомогою еквіпроцентилів ця цифра зменшена до 9,63 % (рис. 3, а). Щоб відчути всю штучність цих результатів, порівняємо їх з результатами за 12-бальною шкалою, отриманими на базі тих самих результатів за «сирими» балами (рис. 3, б). Як бачимо, 24,06 % учасників тестування мають лише початкові знання. При цьому завдяки такому масштабуванню 14,43% (24,06 % - 9,63 %) усіх учасників тестування, а це 33982 особи, отримали можливість при незадовільному рівні знань потрапити до вищої школи.

Щоб до кінця усвідомити цей рівень, звернемось до критеріїв оцінювання навчальних досягнень учнів системи загальної середньої освіти у 12-бальній системі [4] (табл. 1).

Ці критерії відомі всім і не потребують коментарів, звернемо лише увагу на те, що і чотири бали фактично належать до початкового рівня. З рис. 4 видно, що такими початковими знаннями володіє понад сорок відсотків учасників тестування з математики.

На цьому ж рисунку позначено межу 13 «сирих» балів, які відповідають 124 рейтинговим балам за шкалою 100–200 балів при лінійному масштабуванні, і добре видно той відсоток, який мав би залишитися за стінами вишів. Але в шкалі з математики немає 124 балів і першим прохідним балом є 129,5 (106,5, 114,5, 122,5, **129,5**, 135,0). Тому позначки відображують саму цю межу при масштабуванні на базі еквіпроцентилів (А) та лінійному масштабуванні (Б).

Це все факти тестування поточного року, а тепер декілька міркувань загального плану. По-перше, дані

з інших природничих дисциплін не набагато кращі, але зважаючи на меншу кількість учасників, не такі показові. А це вже свідчить про загальну тенденцію. По-друге, функціонери від загальної середньої освіти вже прилаштувались до такої системи загального оцінювання, і, зважаючи на викладене, вона їх цілком задовольняє, приховуючи недоліки в результатах їхньої роботи. По-третє, така система оцінювання, на нашу думку, страшна тим, що якщо на майбутніх тестуваннях усі учасники матимуть знання тільки початкового рівня, наприклад, «сирі» бали не більше восьми, то картина в цілому, намальована за допомогою еквіпроцентилів, буде все одно цілком прийнятною (нормалізованою відносно середини діапазону). Середня школа нібито цілком упорається зі своїм завданням, та і вступати навіть з такими знаннями до вишів буде кому.

У подальшому це вже саме їх (вишів) проблеми і проблеми, на жаль, не малі. Перш за все, проблемою вищої школи в такому випадку стають подвійні стандарти держави щодо освіти, адже не інспекція вищих навчальних закладів, не експертні акредитаційні комісії не використовують подібні «еквіпроцентильні» системи контролю якості знань за акредитаційних вимог забезпечення 90 % успішності та 50 % якості на такому вхідному контингенті. А такі вступники на сьогодні стають студентами переважно технічних та природничих спеціальностей (причому за державним замовленням), де без знання математики взагалі робити нічого. А зважаючи на пряму залежність між контингентом студентів і економічним становищем вищого навчального закладу, такий студент правдами і неправдами зберігається (план випуску за державним замовленням також потрібно виконувати) і нарешті стає фахівцем відповідної в лапках «кваліфікації». І тоді на тлі такої ситуації з якістю освіти всі висновки політичного істеблшменту стосуються тільки саме вищої освіти – від «а навіщо вас таких узагалі фінансувати?» до «та оптимізувати (скоротити) їх усіх треба!».

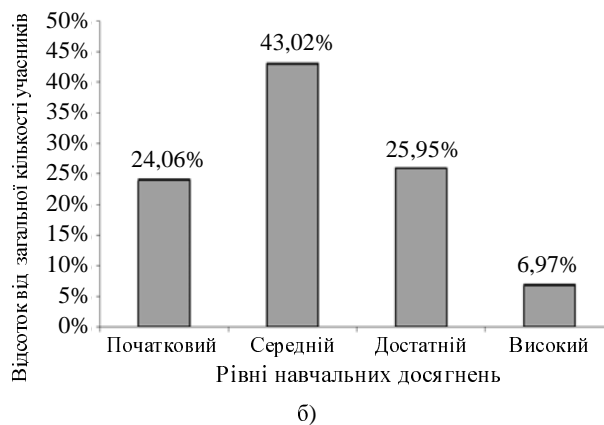
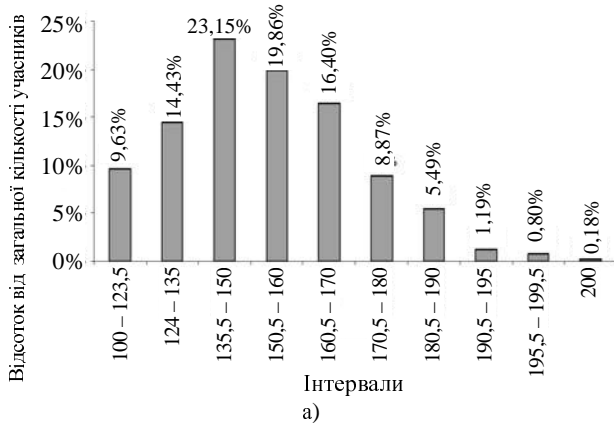


Рис.3. Розподіл учасників тестування з математики:
а – за рейтинговою шкалою, б – за рівнями навчальних досягнень

Таблиця 1

Критерії оцінювання навчальних досягнень учнів системи загальної середньої освіти за 12-бальною системою

Рівні компетенції	Оцінка	Критерії
I. Початковий	1	Учень володіє навчальним матеріалом на рівні елементарного розпізнавання і відтворення окремих фактів, елементів, об'єктів, що позначаються учнем окремими словами чи реченнями
	2	Учень володіє матеріалом на елементарному рівні засвоєння, викладає його уривчастими реченнями, виявляє здатність викласти думку на елементарному рівні
	3	Учень володіє матеріалом на рівні окремих фрагментів, що становлять незначну частину навчального матеріалу
II. Середній	4	Учень володіє матеріалом на початковому рівні, значну його частину матеріалу відтворює на репродуктивному рівні
	5	Учень володіє матеріалом на рівні, вищому за початковий, здатний за допомогою вчителя логічно відтворити значну його частину
	6	Учень може відтворити значну частину теоретичного матеріалу, виявляє знання і розуміння основних положень, за допомогою вчителя може аналізувати навчальний матеріал, порівнювати та робити висновки, виправляти допущені помилки

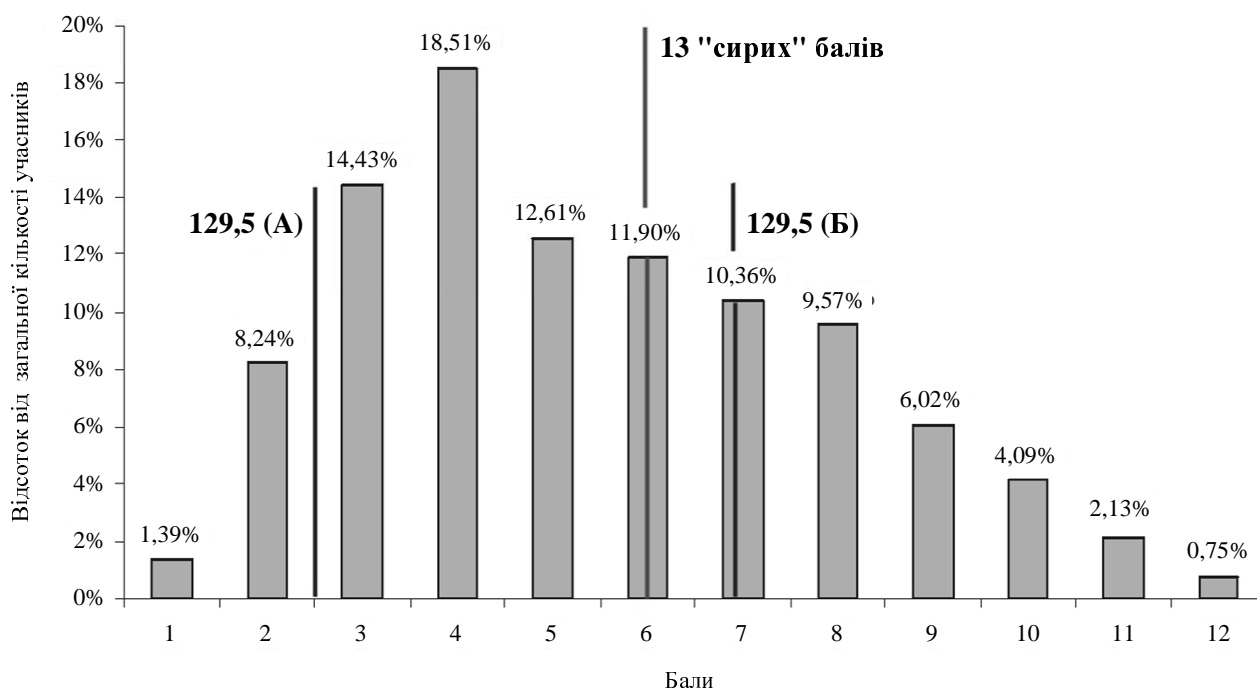
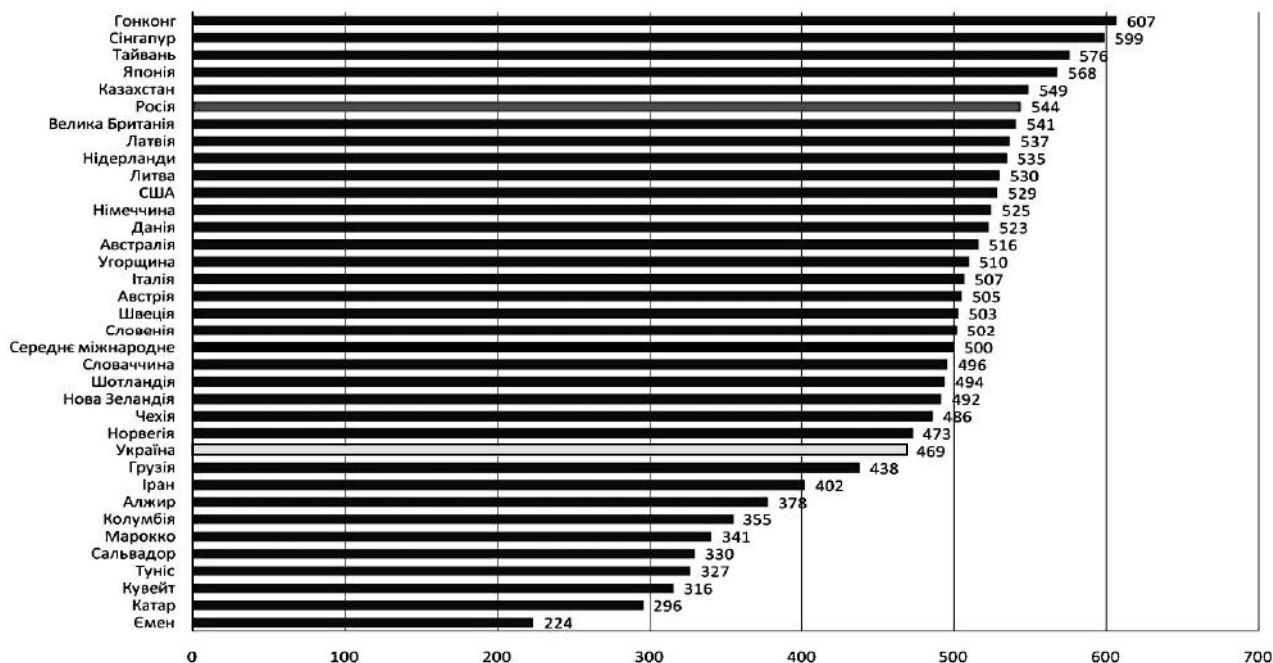
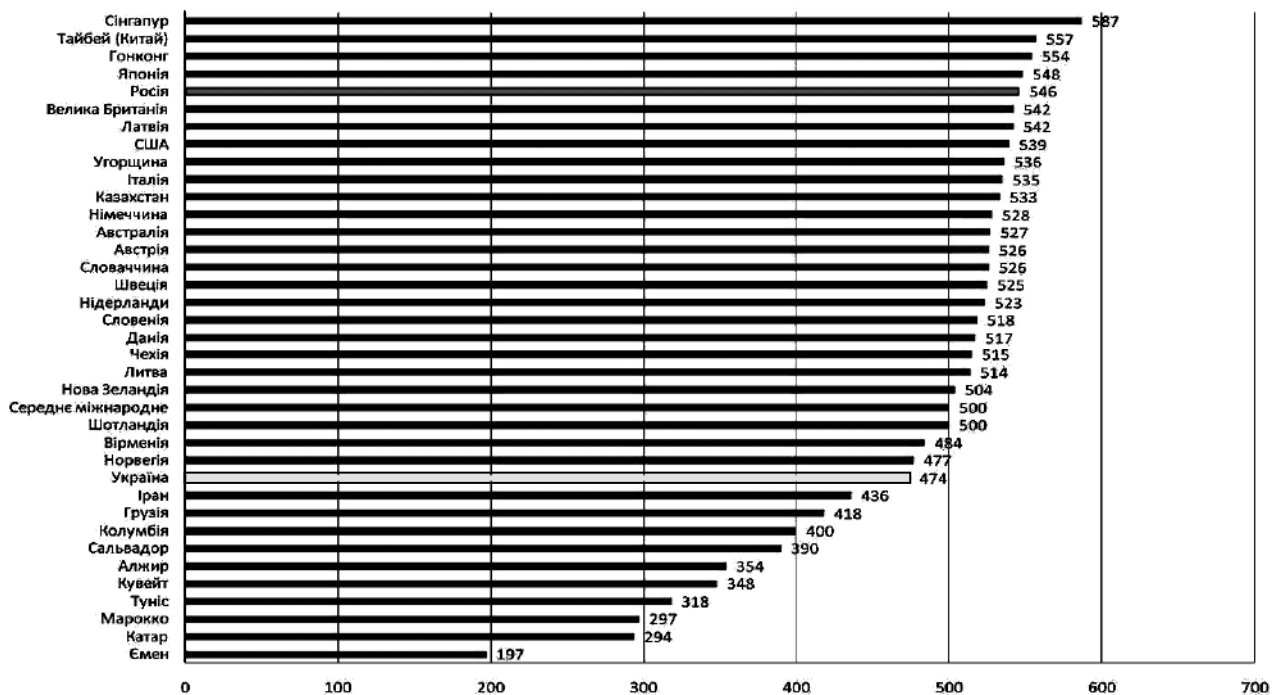


Рис.4. Розподіл учасників тестування з математики за 12-бальною шкалою



а)



б)

Рис. 5 – Результати дослідження TIMSS з математики (за середнім балом):
а – 4-й клас, б – 8-й клас

Та питання загалом не у вищій освіті як такій, не може громадянин європейської держави у XXI столітті не мати елементарних знань з математики (за даними УЦОЯО лише 8,6 % учасників тестування цього року розв'язали елементарну задачу на обчислення витрат фарби для фарбування кімнати, що має форму прямого паралелепіпеда).

Насамкінець звернемось до результатів останнього міжнародного дослідження TIMSS (Trends in Mathematics and Science Study), організаторами проведення якого в Україні були: Міністерство освіти

і науки України; Академія педагогічних наук України; Центр тестових технологій та моніторингу якості освіти Міжнародного фонду «Відродження» [5]. В Україні у дослідженні взяли участь 4498 учнів 4-х та 4527 учнів 8-х класів з 149 шкіл.

Поглянемо на результати дослідження (рис. 5) – вони говорять самі за себе. На рисунку (а) наведено розподіл країн за рівнем середніх знань з математики учнів 4-х класів, на рисунку (б) – учнів 8-х класів.

Додамо до цього декілька слів з висновків дослідження стосовно України: «80 відсотків учнів

початкової школи виявили здатність лише використовувати основні математичні знання у нескладних ситуаціях, інтерпретувати дані. Водночас лише третина учнів змогла виконати завдання на застосування набутих теоретичних знань та вмінь до реальних ситуацій, характерних для повсякденного життя. Школярі 8-х класів справилися з математичними завданнями на перевірку та застосування знань у стандартних ситуаціях. Завдання

з практичним змістом правильно виконали втричі менше восьмикласників».

Глибинне коріння цієї проблеми, на наш погляд, перш за все в перекосах у профілізації класів загальноосвітніх навчальних закладів та недостатній фізико-математичній підготовці в цілому. Для ілюстрації цього звернемося до статистики по Полтавській області стосовно випускників поточного року (рис. 6).

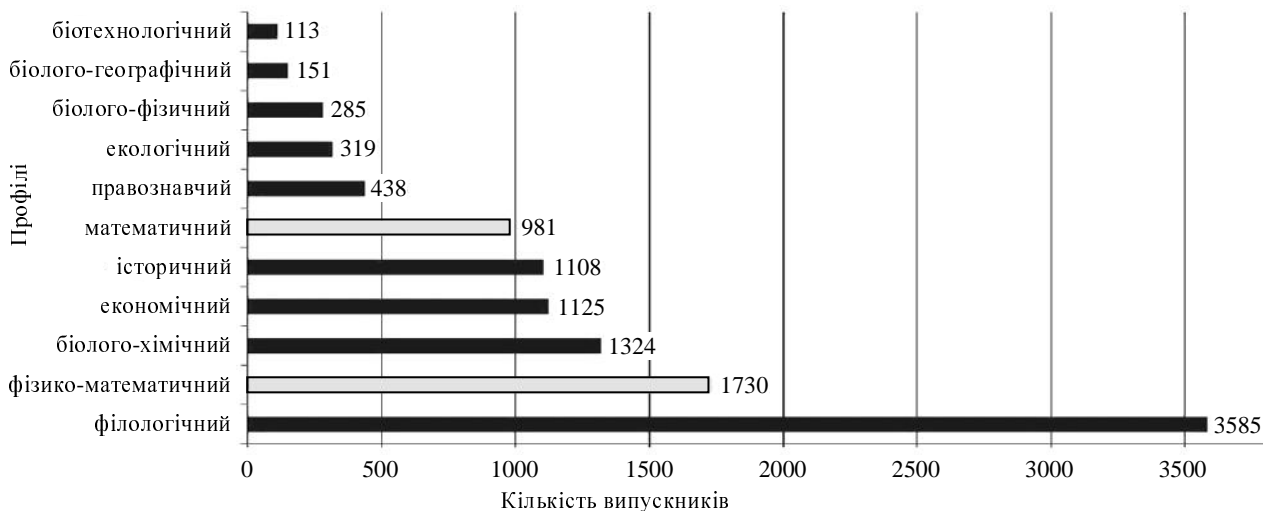


Рис.6. Профілізація випускників 2009 року по Полтавській області

Ми достеменно не знайомі з навчальними планами загальноосвітніх навчальних закладів, але за даними експертів, які узагальнювали ці дані, плани суспільно-гуманітарного, технологічного та філологічного профілів містять три години математики на тиждень (дві години алгебри та годину геометрії), універсал та хіміко-біологічний профілі – чотири години і тільки фізико-математичний – шість і більше годин на тиждень. При цьому рівень знань, який може бути досягнутий при такому навчальному навантаженні, визначається як – тезисні, поверхневі знання (для трьох годин), задовільні (для чотирьох годин), та достатні й добрі (для шістьох і більше годин). Тобто менше 25 відсотків випускників, навіть при нормальній академічній успішності, можуть мати достатній рівень математичної підготовки.

Висновок з усього сказаного може бути тільки один. Якщо терміново і кардинально не змінити ситуацію вже зараз, то у системи еквіпроцентилів в Україні буде довге майбутнє, а відтак майбутнє нашої країни в інноваційному світі виглядає примарним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. «Офіційний звіт про проведення зовнішнього незалежного оцінювання знань випускників загальноосвітніх навчальних закладів України в 2009 році» (скорочений) // Вісник ТiМО. – 2009. – №7–8. – 88 с.
2. Положення «Порядок визначення результатів зовнішнього незалежного оцінювання випускників загальноосвітніх навчальних закладів» // (Затверджено наказом УЦОЯО від 13.04.09 р. №35). – 5 с.
3. Таблиця переведення тестових балів, отриманих учасниками зовнішнього оцінювання за тест з математики в рейтингову шкалу (від 100 до 200 балів) // УЦОЯО. – 2009. – 1 с.

4. Критерії оцінювання навчальних досягнень учнів у 12-бальній системі // (Затверджені наказом МОНУ від 04.09.2000 р. № 428/48).

5. Про результати участі школярів України у міжнародному порівняльному дослідженні TIMSS-2007, Новини Міністерства освіти і науки України від 03.03.09 р. // (http://www.mon.gov.ua/newstmp/2009_1/03_03/doc.doc). – 13 с.

Надійшла 10.11.2009

Загірняк Михайло Васильович, д.т.н., проф.
Кременчуцький державний університет, ректор
e-mail: mzagirn@kdu.edu.ua
Усатюк Володимир Михайлович, к.т.н., доц.
Кременчуцький державний університет, проректор
e-mail: usat@kdu.edu.ua
Україна, 39600, Кременчук, вул. Першотравнева, 20

M.V. Zagirnyak, V.M. Usatyuk

Problems of general secondary education quality from the point of view of the system of estimation of non-school independent assessment results

The paper deals with real state of mathematical training quality in the system of general secondary education in Ukraine on the basis of the analysis of official results of non-school independent assessment of education quality in Mathematics in 2009 from the point of view of comparison of criterial evaluation system results and rating scaling system results, based on equiprocentiles. Higher school problems in the sphere of engineering and natural scientific training, resulting from this situation, have been pointed out.

Key words – equiprocentiles, non-school testing, education quality, rating, criterial evaluation